

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**OPCIÓN I.- TESIS**

**TRABAJO PROFESIONAL**

**“CODIGESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DE  
LA INDUSTRIA CITRÍCOLA EN UN DIGESTOR ANAEROBIO  
A NIVEL PILOTO.”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

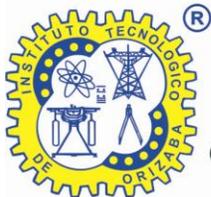
*I. Q. Alma Lucero Luis Garcez*

**DIRECTOR DE TESIS:**

*M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú*

**CODIRECTOR DE TESIS:**

*Dr. Alejandro Alvarado Lassman*





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 28/10/2015  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. ALMA LUCERO LUIS GARCEZ**  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
**CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"CODIGESTION DE RESIDUOS SOLIDOS DE LA INDUSTRIA CITRICO LA EN UN DIGESTOR ANAEROBIO A NIVEL PILOTO."**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

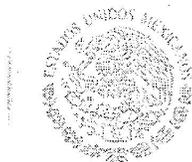
A T E N T A M E N T E

  
M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 14/10/2015

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

**C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES**  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

**ALMA LUCERO LUIS GARCEZ**

la cual lleva el título de:

**"CODIGESTION DE RESIDUOS SOLIDOS DE LA INDUSTRIA CITRICOLA EN UN  
DIGESTOR ANAEROBIO A NIVEL PILOTO."**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

SECRETARIO : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

VOCAL : DR. **JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS**

VOCAL SUP. : M.C. **MARIA ELENA GARCIA REYES**

FIRMA  
FIRMA  
FIRMA  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

OPCION: **I Tesis**



---

## DEDICATORIAS

A mi madre Luisa Garcez por su entereza, fortaleza, tolerancia y calidez. Sus sacrificios y decisiones a lo largo de su vida demuestran su infinito e inmensurable amor. Gracias por ser un ejemplo de superación y por el absoluto apoyo. Nochipa otechmachtih ma nimoketza, otechylchikawilih wan ihkon neh kualli oniktlamih inin tekintl. Tlasohkamati wel miek noxochinantzin.

A mi padre Jorge Luis por cuidar de su familia de manera incondicional y por los valores que continuamente nos ha inculcado. Sus múltiples consejos e innumerables alientos han sido siempre de gran ayuda. Gracias por brindar el apoyo necesario a lo largo de estos años. Tlasohkamati miek notahtzin teh nochipa amo otechkah san ihkoni ma nimokawa, otechilnamiktih ma nimomachti, miek nimitztlasohtla.

A mi hermano David y a mi hermana Yolloketzal, su compañía siempre fue y será parte fundamental en mi vida, son personas incomparables y extraordinarias, gracias por estar presentes aun cuando las circunstancias eran inhóspitas. Contarán conmigo por siempre.

A mis amigas Gabriela, Jacqueline, Janet y Sandra por estar conmigo desde hace muchos años, gracias por sus consejos y sobre todo por su comprensión, espero contar con su valiosa compañía durante toda la vida.

A Karla, Kevin, Roberto, Citlali, Elioenai, Alejandro y Daniel por su amistad rebotante de peculiaridades, gracias por apoyarme y por acompañarme, contarán siempre conmigo a pesar de las múltiples diferencias. A Lucero, Alejandra, Marijose y Rosalba por su ayuda tanto en la etapa experimental de este trabajo como en la de esparcimiento.

A todas las personas que participaron de manera indirecta con su apoyo como Alhely, Sam y Soda, muchas gracias por estar conmigo a pesar de no verlos continuamente.

---

## RECONOCIMIENTOS

Agradezco a la M.I.Q. Norma A. Vallejo Cantú por haber dirigido el desarrollo de este trabajo, por sus recomendaciones, paciencia, amabilidad y por todos los medios que facilitó para poder llevar a cabo esta investigación. Al Dr. Alejandro Alvarado Lassman por sus asesorías, sus observaciones durante todo el periodo de trabajo y por los consejos que hicieron posible la realización de esta investigación.

Al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras por su amabilidad, por sus consejos y por las asesorías impartidas. A la M.C. María Elena García Reyes por sus contribuciones durante las clases impartidas.

A mi tutor el M.I.A. Adrián Reyes Benítez por sus recomendaciones desde el principio de la investigación y por su gentileza.

Agradezco al Maestro Arturo Alvarado Lassmann por sus valiosas contribuciones, consejos y por compartir sus conocimientos.

Al CONACYT por otorgarme la beca con número de registro 545938, gracias a su apoyo fue posible realizar esta investigación.

---

## RESUMEN

### **Codigestión de residuos sólidos de la industria citrícola en un digestor anaerobio a nivel piloto**

Elaborado por: I.Q. Alma Lucero Luis Garcez  
Dirigido por: M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú  
Dr. Alejandro Alvarado Lassman

La disposición final incorrecta de los residuos sólidos de la industria citrícola genera problemas graves de contaminación debido su pH ácido característico y su elevada concentración de materia orgánica, una opción viable para aprovechar estos residuos es la digestión anaerobia con las Excretas Bovinas (EB) ya que su comunidad bacteriana esta acondicionada a digerir alto contenido lignocelulósico, por esta razón el objetivo de esta investigación fue realizar el tratamiento de estos residuos mediante la codigestión anaerobia en un digestor a nivel piloto. Se inoculó el digestor anaerobio con EB extraídas de un reactor que presentaba altas remociones de materia orgánica, seguido de un lote de arranque (30 d) y dos de estabilización (30 y 31 d), todos con el 100% de EB, durante estos 3 primeros lotes se alcanzaron remociones del 77.57, 79.97 y 88.22% de DQO<sub>T</sub>, obteniendo rendimientos de metano de 0.337, 0.347 y 0.322 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> respectivamente. Se realizaron pruebas a escala laboratorio para evaluar la viabilidad de la codigestión de los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) con las EB, el efecto del pH y la concentración de inóculo en diferentes mezclas y se obtuvo que la codigestión favoreció la producción de biogás en comparación con la digestión de excretas bovinas por sí solas sin embargo tuvo que ajustarse el pH para que las mezclas no se inhibieran. Por tal motivo la adición de RSC al digestor anaerobio comenzó progresivamente con el 10, 20 y 30% en los lotes 4, 5 y 6 respectivamente, obteniéndose remociones considerables de materia orgánica, llegando a un rendimiento de metano de 0.331 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> en el último lote. Después de operar el digestor en modo batch se comenzó a operar de manea semicontínua, sin embargo las remociones de materia orgánica disminuyeron al igual que la producción de biogás, por lo tanto se volvió a realizar una prueba a nivel laboratorio después de 30 d sin alimentar el reactor y se obtuvieron rendimientos de metano que superaron a las mezclas anteriormente evaluadas, es decir que a pesar de la elevada carga orgánica presente, las bacterias lograron adaptarse, por lo tanto se concluye que la codigestión de los RSC y las EB es posible si se mantiene cuidado en los parámetros como el pH y la concentración de sustrato e inóculo.

---

## ABSTRACT

### **Co-digestion of solid waste from the citrus industry in an anaerobic digester pilot level**

By: I.Q. Alma Lucero Luis Garcez

Advisor: M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

The final improper disposal of solid waste from the citrus industry creates serious pollution problems due to its characteristic acidic pH and high concentration of organic matter, a viable option to take advantage of this waste is anaerobic digestion with Bovine Excreta (BE) as the bacterial community is conditioned to digest lignocellulosic high content, therefore the objective of this research was to make the treatment of this waste through anaerobic co-digestion in a digester at the pilot level. Anaerobic digester was inoculated with BE extracted from a reactor showed high removal of organic matter, followed by a batch of starter (30 d) and two stabilization batches (30 and 31 d), all the 100% BE, during these first 3 batches were achieved removals of 77.57, 79.97 and 88.22% for  $COD_T$ , obtaining methane yields 0.337, 0.347 and 0.322  $LCH_4/gCOD_{Trem}$  respectively. Scale laboratory tests were conducted to evaluate the feasibility of co-digestion of solid waste citrus (SWC) with the BE, the effect of pH and concentration of inoculum in different mixtures and obtained the co-digestion biogas production favored compared with the digestion of cattle manure alone but had to adjust the pH to not inhibit mixtures. Therefore the addition of SWC began gradually to anaerobic digester with 10, 20 and 30% in the batches 4, 5 and 6 respectively, yielding substantial removal of organic matter, and leading to a methane yield of 0.331  $LCH_4/gCOD_{Trem}$  in last batch. After operating the digester in batch mode it began operating semi-continuous, but the removal of organic matter decreased as the production of biogas, so turned to a test at laboratory level after 30 d without feeding the reactor and yields of methane that exceeded those previously of mixtures. It is that despite the high organic matter, bacteria could adapt, therefore it is concluded that co-digestion of the SWC and BE is possible if kept carefully in parameters such as pH and the concentration of substrate and inoculum.

# ÍNDICE

<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Clasificación de los residuos .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Residuos peligrosos .....	5
1.1.2. Residuos Sólidos Urbanos (RSU) .....	6
1.1.3. Residuos de manejo especial .....	6
1.1.3.1. Residuos agroindustriales.....	7
1.1.3.2. Características y propiedades de los residuos agroindustriales.....	7
1.1.3.3. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales .....	9
<b>1.2. Industria cítrica .....</b>	<b>10</b>
1.2.1. Producción de cítricos en el mundo y en México. ....	10
<b>1.3. Características de la naranja.....</b>	<b>11</b>
1.3.1. Problemática ambiental de los residuos cítricos .....	13
1.3.2. Características y propiedades de los residuos cítricos .....	14
<b>1.4. Industria ganadera .....</b>	<b>15</b>
1.4.1. Problemática ambiental de los residuos bovinos .....	15
1.4.2. Características y propiedades de las excretas bovinas .....	16
<b>1.5. Digestión anaerobia.....</b>	<b>17</b>
1.5.1. Etapas de la digestión anaerobia.....	18
1.5.2. Productos de la digestión anaerobia .....	19
1.5.2.1. Biogás .....	20
1.5.2.2. Biofertilizante .....	21
<b>1.6. Codigestión de residuos orgánicos.....</b>	<b>22</b>
<b>1.7. Reactores.....</b>	<b>23</b>
1.7.1. Reactor de mezcla completa sin recirculación.....	23
1.7.2. Reactor de mezcla completa con recirculación. ....	23
1.7.3. Reactor con retención de Biomasa, sin recirculación. ....	24

1.7.4.	Reactor discontinuo.....	24
1.7.5.	Reactor en dos etapas. ....	24
<b>1.8.</b>	<b>Digestor anaerobio .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>27</b>
<b>2.1.</b>	<b>Acondicionamiento y adaptación del digestor anaerobio.....</b>	<b>28</b>
2.1.1.	Características del digestor anaerobio. ....	28
<b>2.2.</b>	<b>Obtención y caracterización de muestras de RSC e inóculo de EB.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.</b>	<b>Obtención y caracterización de RSC y EB para la alimentación del digestor anaerobio.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.</b>	<b>Inoculación, arranque y estabilización del digestor en modo batch.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.</b>	<b>Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia a escala laboratorio .....</b>	<b>34</b>
2.5.1.	Etapa 1.....	34
2.5.2.	Efecto del pH y la concentración de RSC en la codigestión con las EB.....	36
<b>2.6.</b>	<b>Alimentación con RSC y monitoreo del digestor en modo batch.....</b>	<b>37</b>
<b>2.7.</b>	<b>Determinación de la Carga Volumétrica Aplicada (CVA) .....</b>	<b>38</b>
<b>2.8.</b>	<b>Cambio de operación del digestor anaerobio a modo semicontínuo ....</b>	<b>40</b>
2.8.1.	Adaptación de la alimentación .....	40
2.8.2.	Alimentación en modo semicontínuo.....	40
<b>2.9.</b>	<b>Estabilización y monitoreo del digestor anaerobio en modo semicontínuo .....</b>	<b>41</b>
<b>2.10.</b>	<b>Evaluación y análisis del acondicionamiento del sustrato a escala laboratorio.....</b>	<b>41</b>
<b>2.11.</b>	<b>Análisis y determinación de parámetros fisicoquímicos .....</b>	<b>42</b>
2.11.1.	Determinación de pH.....	42
2.11.2.	Determinación de DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>5</sub> .....	42
2.11.3.	Determinación de ST y STV .....	44
2.11.4.	Composición de Biogás.....	46
2.11.5.	Carga Volumétrica Aplicada (CVA).....	46
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>48</b>
<b>3.1.</b>	<b>Acondicionamiento y adaptación del digestor anaerobio.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.</b>	<b>Obtención y caracterización de muestras de RSC e inóculo de EB.....</b>	<b>49</b>

<b>3.3. Obtención y caracterización de RSC y EB para la alimentación del Digestor Anaerobio.....</b>	<b>51</b>
<b>3.4. Inoculación, arranque y estabilización del digestor en modo batch.....</b>	<b>52</b>
<b>3.5. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia a escala laboratorio .....</b>	<b>57</b>
3.5.1. Etapa 1.....	57
3.5.2. Efecto del pH y la concentración de RSC en la codigestión con las EB.....	59
<b>3.6. Alimentación con RSC y monitoreo del digestor en modo batch.....</b>	<b>64</b>
<b>6.1. Determinación de la Carga Volumétrica Aplicada (CVA) .....</b>	<b>70</b>
<b>6.2. Cambio de operación del digestor anaerobio a modo semicontínuo ....</b>	<b>72</b>
6.2.1. Adaptación de la alimentación .....	72
6.2.2. Alimentación en modo semicontínuo.....	75
<b>6.3. Estabilización y monitoreo del digestor anaerobio en modo semicontínuo .....</b>	<b>76</b>
<b>6.4. Evaluación y análisis del acondicionamiento del sustrato a escala laboratorio.....</b>	<b>79</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Partes principales de la naranja	11
Figura 1.2. Residuos cítricos dispuestos en lagunas aerobias	13
Figura 1.3. Aplicaciones del biogás	20
Figura 1.4. Digestor anaerobio	25
Figura 2.1. Esquema general de la metodología experimental	27
Figura 2.2. Separación de los RSC del efluente mediante cribas	30
Figura 2.3. Dilución de los RSC para su caracterización	30
Figura 2.4. Muestreo de RSC	32
Figura 2.5. Obtención de excretas bovinas diluidas	33
Figura 2.6. Matraces acondicionados para pruebas de biodegradabilidad	35
Figura 2.7. Matraces evaluados en la etapa 1	35
Figura 2.8. Mezclas en el agitador orbital	37
Figura 2.9. Aceites esenciales presentes en los residuos cítricos	38
Figura 2.10. Residuos sólidos cítricos utilizados para la alimentación del digestor	39
Figura 2.11. Centrífuga, placa digestora y espectrofotómetro utilizados	43
Figura 2.12. Diluciones de los RSC para determinar DQO	44
Figura 2.13. Balanza analítica, estufa y mufla utilizadas	45
Figura 2.14. Muestras de RSC y EB calcinadas	45
Figura 2.15. Cromatógrafo de gases utilizado	46
Figura 3.1. Esquema general del Digestor Anaerobio	49
Figura 3.2. Comportamiento del pH	52

Figura 3.3. Comportamiento de la DQO total y soluble	53
Figura 3.4. Comportamiento de los Sólidos Totales y Volátiles	54
Figura 3.5. Producción diaria de biogás	55
Figura 3.6. Porcentaje de CH <sub>4</sub> durante la producción de biogás	55
Figura 3.7. Degradación de la DQO Total en la Etapa 1	57
Figura 3.8. Monitoreo del pH en la durante la evaluación	59
Figura 3.11. Comparación del porcentaje de degradación de la DQO Total	60
Figura 3.10. Producción de biogás	62
Figura 3.11. Comportamiento del pH de los RSC más las EB	65
Figura 3.12. Comportamiento de la DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>S</sub> de los RSC más las EB	66
Figura 3.13. Comportamiento de los ST y los STV de los RSC más las EB	67
Figura 3.14. Producción diaria de biogás en los lotes 4, 5 y 6	68
Figura 3.15 Porcentaje de metano en los lotes 4, 5 y 6	68
Figura 3.16 Producción diaria de biogás en cada lote	71
Figura 3.17 Comportamiento de la DQOT en el reactor	74
Figura 3.18 Comportamiento de la DQO <sub>T</sub> en digestor	77
Figura 3.19. Monitoreo del pH durante la evaluación	80
Figura 3.20. Comportamiento de la DQO <sub>T</sub> durante la digestión en los matraces	80
Figura 3.21. Comportamiento de los sólidos totales en cada mezcla	81
Figura 3.22. Generación diaria de biogás	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Uso porcentual de materia prima en diferentes sectores	8
Tabla 1.2. Composición nutricional de naranja Valencia (Cantidad contenida en 100 g)	12
Tabla 1.3. Propiedades de los residuos cítricos (Cantidad contenida en 100 g)	14
Tabla 1.4. Caracterización de los residuos cítricos	14
Tabla 1.5. Caracterización de excretas bovinas	16
Tabla 2.1. Materiales y accesorios utilizados en el Digestor Anaerobio	28
Tabla 2.2. Características del Digestor Anaerobio (DA)	29
Tabla 2.3. Determinaciones utilizadas para la caracterización de los RSC y EB	31
Tabla 2.4. Mezclas utilizadas en la etapa 1	34
Tabla 2.5. Mezclas utilizadas para la evaluación del pH y concentración	36
Tabla 2.6. Mezclas para la evaluación del acondicionamiento	42
Tabla 3.1. Características de las muestras	50
Tabla 3.2. Características del inóculo (EB) y sustrato (RSC)	51
Tabla 3.3. Biogás acumulado en cada lote y rendimientos de metano	56
Tabla 3.4. Degradación de la DQO Total en la Etapa 1	58
Tabla 3.5. Composición del biogás y rendimiento de metano en la Etapa 1	58
Tabla 3.6. Comparación de la remoción de materia orgánica	61
Tabla 3.7. Rendimiento de metano y remoción de STV	63
Tabla 3.8. Producción de biogás y rendimientos de metano en los lotes 4, 5 y 6	69
Tabla 3.9. Composición de materia orgánica en cada lote	70
Tabla 3.10. Rendimiento de metano máximo alcanzado en cada lote	71

Tabla 3.11. Composición y remoción diaria del digestor	73
Tabla 3.12. Generación de biogás y rendimiento de metano	74
Tabla 3.13. Composición y remoción diaria del digestor en modo semicontínuo	76
Tabla 3.14. Producción de metano diaria y su composición	78
Tabla 3.15. Proporciones de las mezclas evaluadas	79
Tabla 3.16. Remoción de materia orgánica en las mezclas evaluadas	81
Tabla 3.17. Composición y rendimiento del biogás	83

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar la codigestión de los residuos sólidos de la industria citrícola en combinación con excretas de ganado bovino en un digestor anaerobio para analizar y evaluar la producción de biogás y las propiedades de la biomasa.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Adaptar y arrancar el Digestor para la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU).
2. Operar el digestor en modo batch.
3. Operar el digestor en modo semicontínuo.
4. Evaluar la codigestión de los residuos sólidos provenientes de la industria citrícola.

## INTRODUCCIÓN

En México la producción de naranja se ha incrementado de manera considerable en los últimos años ya que la industria cítrica se establece principalmente en regiones tropicales y subtropicales en donde los principales productos como la naranja (*Citrus Sinensis*) tienen condiciones propicias para su correcto crecimiento, de esta manera, el país se ha colocado en el cuarto lugar a escala mundial pues la citricultura es una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura nacional y se destina aproximadamente medio millón de hectáreas para este propósito, las cuales se distribuyen en 23 estados (ASERCA, 2010).

El estado de Veracruz cuenta con zonas que presentan un clima favorable y constante para la producción de cítricos y es uno de los motivos primordiales por los que ocupa el primer lugar en producción a nivel nacional en la industria cítrica con aproximadamente de 2,433,000 Ton al año (SIAP, 2013). Los principales municipios productores son Temapache, Martínez de la Torre, Tiahutlán y Papantla.

Durante el proceso de fabricación de los néctares, jugos y otros derivados de los frutos cítricos, especialmente de la naranja, se genera un gran volumen de aguas residuales así como también los denominados Residuos Sólidos Cítricos (RSC) que comprenden las cáscaras, semillas, fibras y membranas, así que México al pertenecer al grupo de los países productores líderes en cuanto al cultivo de cítricos, y teniendo en cuenta que una gran parte de su producción se destina a consumo interno, lo convierte en un generador importante de este tipo de residuos ya que alrededor del 50% del fruto corresponde sólo a los RSC (Rojas *et al.*, 2009).

En la industria cítrica mexicana estos desechos por lo regular carecen de una disposición final correcta y ésto genera un problema serio de contaminación que va desde la generación de olores desagradables hasta la presencia de vectores (insectos, roedores, parásitos, etc.), el alto contenido de carga orgánica y un pH bajo (Ozbas *et al.*, 2006).

## JUSTIFICACIÓN

El estado de Veracruz permanece como líder en la producción de cítricos a nivel nacional y por lo tanto, también es el principal estado que alberga varias industrias cítricas de gran tamaño e impacto socioeconómico, que además constantemente están en crecimiento. Consecuentemente la problemática de la generación de los residuos sólidos cítricos ha ido en aumento, sin embargo en las últimas décadas también se ha incrementado el interés para su correcto aprovechamiento.

Los residuos sólidos cítricos generalmente pueden ser utilizados para una amplia gama de productos como por ejemplo la obtención de aceites esenciales, la extracción del compuesto D-limoneno, pectina, bioetanol, material enzimático, material para la absorción de contaminantes, suplemento para la elaboración del papel, sustrato para la obtención de flavonoide, repelente de insectos, entre otros, sin embargo demandan un alto costo debido al uso de avanzadas tecnologías. (Raposo *et al.*, 2006)

La mayoría de los procesos alternativos que se le dan a los residuos sólidos de la industria cítrica regularmente utilizan estos residuos cuando aún mantienen sus propiedades, es decir antes de las diversas operaciones unitarias por las que atraviesan los cítricos, por lo que no es común que las industrias los aprovechen al final de todo el proceso.

Una de las alternativas para tratar y aprovechar los residuos sólidos cítricos es la digestión anaerobia ya que además de ser eficaz y económicamente atractiva, reduce la carga orgánica y se controla la emisión de gases de efecto invernadero pues el Biogás que se produce puede ser utilizado como combustible, es decir para la generación energía, por lo que en este trabajo se pretende establecer las bases para implementar la digestión de los RSC mediante la utilización de inóculo conformado por excretas bovinas, es decir evaluar la codigestión.

# **CAPÍTULO 1**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El elevado índice de crecimiento poblacional, la industrialización y la implementación de modelos económicos que conllevan al aumento sostenido del consumo, han impactado significativamente el volumen y la composición de los residuos producidos por la sociedad, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos. Las consecuencias ambientales de la inadecuada disposición de los residuos pueden ser negativas para la salud de las personas y de los ecosistemas naturales. En la actualidad, el problema de su tratamiento es una gran preocupación para las sociedades en general, pero en nuestro país, los métodos para su disposición, transformación y aprovechamiento han resultado ineficientes e insuficientes, lo que provoca contaminación del medio ambiente.

### 1.1. Clasificación de los residuos

De acuerdo con la fuente de generación y las características que presentan, los residuos se clasificaban en sólidos municipales y los llamados residuos peligrosos, es decir todos aquellos residuos provenientes de casa habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso, pero a partir del año 2003, con la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003), ahora los residuos se clasifican como peligrosos, sólidos urbanos y especiales.

#### 1.1.1. Residuos peligrosos

Son aquellos que poseen alguna de las características CRETI (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad) que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados al ser transferidos a otro sitio.

### **1.1.2. Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**

Son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

La generación de RSU se ha incrementado notablemente en los últimos años; tan sólo entre 2003 y 2011 creció 25%, como resultado principalmente del crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas, el gasto de la población y el cambio en los patrones de consumo. La generación total de RSU en el país difiere de manera importante a nivel geográfico, en el año 2011 la región Centro contribuyó con el 51% de la generación total en el país, seguida por la región Frontera Norte (16%) y el Distrito Federal. (SEDESOL, 2012).

El problema de los RSU en México es preocupante conforme pasa el tiempo, en el 2012 se reportó una generación de 94,800 Toneladas diarias de RSU, lo que significa 34.6 millones de Toneladas anuales, cuya composición aproximada es: 53% de residuos orgánicos y 47% de inorgánicos; de estos últimos, el 28% es potencialmente reciclable y 19% corresponde a residuos no aprovechables. Se estima que, para 2015, se generará 22% más de RSU, eso sin considerar el aumento poblacional.

### **1.1.3. Residuos de manejo especial**

Son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

### **1.1.3.1. Residuos agroindustriales.**

Es una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para generar alimentos o materias primas semielaboradas destinadas al mercado. Constituye una parte del sector industrial que se dedica a producir y/o transformar, almacenar y comercializar productos provenientes del campo, por ejemplo: frutas, verduras, raíces, semillas, hojas, tubérculos y vainas; algunos se comercializan en fresco y otros son transformados en néctares, jugos, mermeladas, ensaladas, harinas, aceites, vinos, concentrados en polvo y conservas, por mencionar algunos. La tendencia mundial es el notable crecimiento en la generación de residuos, derivado del incremento en la generación de productos comercializables (Yepes *et al.*, 2008; Saval, 2012).

Los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social. El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no se tiene una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final (Marañón *et al.*, 2009).

### **1.1.3.2. Características y propiedades de los residuos agroindustriales**

En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina (BNDES, 2008).

Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina residuos orgánicos, dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales.

Valdez-Vázquez *et al.* (2010), publicaron datos oficiales de 2006 que establecen que en México se produjeron 75.73 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60.13 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15.60 millones de toneladas corresponden a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, así como pulpa de café.

A continuación en la Tabla 1.1 se muestra un ejemplo de la generación de residuos agroindustriales en diferentes sectores, de acuerdo al porcentaje de la materia prima utilizada y la desechada (Saval, 2012).

Tabla 1.1. Uso porcentual de materia prima en diferentes sectores.

<b>Sector / Materia Prima</b>	<b>Se utiliza</b>
Industria Cervecera (grano)	8 %
Aceite de Palma	9 %
Industria del Café	9.5 %
Industria del Papel	Menos del 30 %
Industria Citrícola	Menos del 40 %

Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos, se hace necesaria su caracterización para conocer su composición, la calidad de sus componentes y la cantidad que se genera, con esto se pueden definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y posterior tratamiento.

El principal componente de los residuos agroindustriales es la lignocelulosa, la cual está constituida por tres fracciones principales: celulosa (40-60%) que está protegida por hemicelulosa (20-40%) y por lignina (10-25%) (BNDES, 2008). La celulosa es un polímero lineal del dímero glucosa–glucosa con enlaces  $\beta$ -1,4 (celobiosa), su hidrólisis genera unidades de D-glucosa.

La celulosa tiene una estructura muy cristalina, rígida y difícil de romper. La hemicelulosa es un heteropolisacárido que contiene 15% de hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) y 85% de pentosas (D-xilosa 75% y L-arabinosa 10%), además de ácidos metilglucurónico, galacturónico y glucurónico; la hemicelulosa es mucho más fácil de hidrolizar que la celulosa, pero la fermentación de las pentosas que genera no está muy desarrollada. La lignina es un heteropolímero amorfo ramificado de naturaleza fenólica con grupos metoxi y fenilpropánicos formado por alcoholes aromáticos como cumarílico, coniferílico y sinapílico (BDNES, 2008; Carreón *et al.*, 2009; Cuervo *et al.*, 2009).

### **1.1.3.3. Aprovechamiento de los residuos agroindustriales**

Debido a su alto contenido de material lignocelulósico, los residuos agroindustriales han sido estudiados y evaluados como sustrato por diversas instituciones e investigadores en búsqueda de alternativas para su aprovechamiento, entre las cuales destacan aquellas en donde estos residuos se utilizan para la generación de bioetanol, biodisel, biohidrógeno y biogás.

Un ejemplo de su utilización fue en Grecia, en donde se realizó un estudio mediante reactores anaerobios, en el que utilizaron aguas residuales provenientes de la producción de aceite de oliva, estiércol de vaca y suero de queso con las bacterias presentes en los residuos; el residuo resultante fue útil como fertilizante, sin embargo no se evaluaron sus características (Dareitoti *et al.*, 2009). En Colombia, Sandoval *et al.* (2009), estudiaron la digestión anaerobia de residuos orgánicos urbanos, lodos de

una planta de tratamiento y estiércol de cerdo, en donde mencionaron que el efluente se puede utilizar como biofertilizante.

## **1.2. Industria cítrica**

El sureste de México es una de las principales regiones productoras de cítricos del país, donde se genera un gran volumen de desechos sólidos de cítricos (cáscara, semillas, membranas, etc.). Este desecho proviene de la obtención de jugos y, normalmente, se envía a tiraderos a suelo abierto, por lo que genera un problema serio de contaminación. Esta situación hace deseable el aprovechamiento de los desechos para la generación de productos de alto valor agregado (Rojas *et al.*, 2009; Ozbas *et al.*, 2006)

### **1.2.1. Producción de cítricos en el mundo y en México.**

La producción mundial de cítricos es alrededor de 88 millones de toneladas por año (Marín, 2007). Los dos mayores productores de cítricos son Brasil y Estados Unidos, participando respectivamente con el 21.4% y 12.5% de la producción mundial. Siguen en orden de importancia China, México, España e India, representando en conjunto el 27.6 % del total mundial. Otros productores que merecen mencionarse son Irán, Argentina, Egipto y Turquía (FAO, 2011). Se podrá advertir que aunque la citricultura se extiende entre varios países, la producción y el comercio revelan un cierto grado de concentración.

México ha pertenecido tradicionalmente al grupo de los productores líderes. En la actualidad, nuestro país se ubica como el cuarto productor de cítricos en el mundo (SIAP, 2013). Para México, la citricultura es una actividad de gran importancia dentro de la fruticultura nacional y se destina aproximadamente medio millón de hectáreas para este propósito, las cuales se distribuyen en 23 estados con clima tropical y subtropical de la república. Los estados de mayor importancia en producción son Veracruz, (226, 740.72 ha), San Luis Potosí (47, 743.5 ha), Tamaulipas (41, 746.63 ha), Michoacán (41, 283.97 ha), Nuevo León (30, 759.4 ha), Puebla (25, 959.5 ha) y Colima (21, 614 ha).

El cultivo de cítricos representa una fuente importante de ingreso en zonas rurales de nuestro país. Se estima que cerca de 67 000 familias dependen de esta actividad, la que genera más de 6 millones de toneladas de frutos cítricos, con un valor superior a los 8 mil 50 millones de pesos (ASERCA, 2010).

### 1.3. Características de la naranja

Dentro de la industria citrícola, el fruto de mayor utilización para sus diversos productos es la naranja debido a su bajo costo y su contenido de múltiples nutrientes como vitaminas, minerales y fibra (Meléndez-Martínez *et al.*, 2008) en la Figura 1.1 se muestra el corte radial de un fruto de la especie *Citrus Sinensis*, en donde se observan los 3 componentes principales de la naranja: exocarpo, mesocarpo y endocarpo (Roussos, 2011).

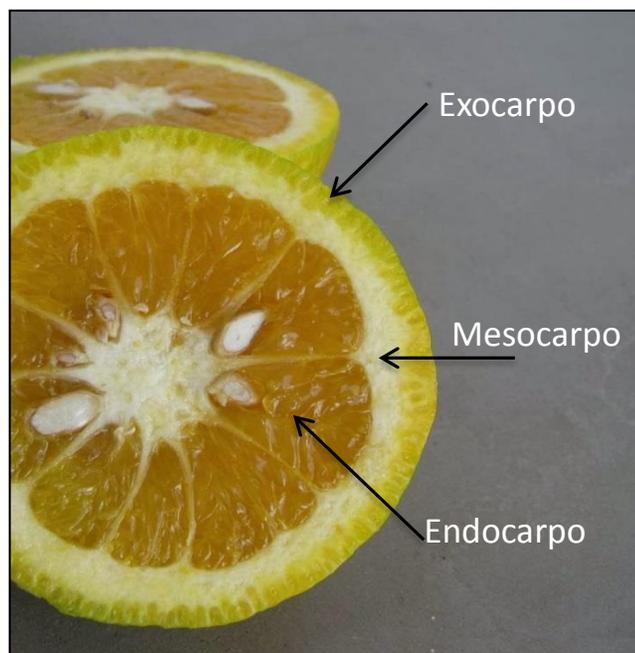


Figura 1.1. Partes principales de la naranja.

El exocarpo también conocido como flavedo es una capa que contiene cloroplastos los cuales cambian de color de acuerdo a la maduración de la fruta además de contener sacos con aceites esenciales, éstos varían en tamaño de 0.4 a 0.6 mm.

El mesocarpo o albedo es la capa de color blanco que se observa en la Figura 1.1 y puede llegar a constituir de un 20 a un 60% de la totalidad de la fruta dependiendo de su maduración. El componente de interés comercial que se encuentra en el mesocarpo es la pectina debido a sus características coloidales. El eje central es la misma composición que el albedo.

En el endocarpo se encuentra la parte comestible compuesta por segmentos llenos de vesículas con jugo en su interior, en la Tabla 1.2 se observan los compuestos nutricionales de la naranja reportados por la USDA (2010).

Tabla 1.2. Composición nutricional de naranja Valencia (Cantidad contenida en 100 g)

<b>Nutriente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Naranja</b>	<b>Naranja sin cáscara</b>	<b>Cáscara de naranja</b>
Agua	g	82.3	86.75	72.5
Energía	kcal	63	47	97
Proteínas	g	1.3	0.94	1.5
Lípidos totales	g	0.3	0.12	0.2
Cenizas	g	0.6	0.44	0.8
Carbohidratos	g	15.5	11.75	25
Fibra total	g	4.5	2.4	10.6
Azúcares totales	g	--	9.35	--
Calcio	mg	70	40	161
Hierro	mg	0.8	0.1	0.8
Magnesio	mg	14	10	22
Fósforo	mg	22	14	21
Potasio	mg	196	181	212
Zinc	mg	0.11	0.07	0.25
Cobre	mg	0.057	0.045	0.092
Niacina	mg	0.5	0.282	0.9
Riboflavina	mg	0.05	0.04	0.09
Vitamina A	IU	250	225	420
Vitamina B-6	mg	0.093	0.06	0.176
Vitamina C	mg	71	53.2	136
Vitamina E	mg	--	0.18	0.25

### 1.3.1. Problemática ambiental de los residuos cítricos

Durante el procesamiento de los cítricos, sólo menos de la mitad del peso total del fruto es transformado en productos alimenticios (Braddock, 1995) generando una gran cantidad de residuos como la cáscara, semillas y los demás frutos que fueron descartados por no cumplir con los requerimientos de calidad, todos estos se consideran como residuos cítricos (Wilkins *et al.*, 2007a). La industria citrícola genera mundialmente de 8 a 20 millones de toneladas al año de residuos sólidos y líquidos (Rezzadori *et al.*, 2012).

En la mayoría de los casos, éstos residuos son dispuestos en los suelos cercanos a la industria citrícola o en las locaciones productoras, también es utilizado como alimento animal o simplemente quemado (Martín *et al.*, 2010; Tripodo *et al.*, 2004). En la Figura 1.2 se observa la disposición de los residuos cítricos en una industria citrícola en el estado de Veracruz.



Figura 1.2. Residuos cítricos dispuestos en lagunas aerobias.

En la industria citrícola ubicada al norte del estado de Veracruz los residuos son una combinación de líquidos y sólidos, los cuales son separados por cribas antes de ser depositados en lagunas aerobias y en suelos agrícolas respectivamente.

### 1.3.2. Características y propiedades de los residuos cítricos

Existen trabajos de investigación en los que se han evaluado las características y los componentes de los residuos cítricos, sin embargo estos estudios reportan cantidades de propiedades diferentes ya que los residuos obtenidos son de diversas industrias. En la Tabla 1.3 se muestran los múltiples compuestos de los residuos cítricos.

Tabla 1.3. Propiedades de los residuos cítricos (Cantidad contenida en 100 g)

Componente	Unidad	Rivas <i>et al.</i> , 2008	Pourbafrani <i>et al.</i> , 2010
Azúcares solubles	g	16.9	22.9
Celulosa	g	9.21	22
Hemicelulosa	g	10.5	11.09
Lignina	g	--	2.19
Pectina	g	42.5	25
Proteína	g	--	6.07
Ceniza	g	--	3.73
D-Limoneno	g	--	3.78

En la Tabla 1.4 se observa la comparación de la caracterización fisicoquímica reportada por dos diferentes trabajos.

Tabla 1.4. Caracterización de los residuos cítricos

Parámetro	Koppar <i>et al.</i> , 2013	Martín <i>et al.</i> , 2010
pH	4.6 - 4.8	3.42 - 4.31
DQO	8620 mg/L	1085 mg/g
DBO <sub>5</sub>	5050 mg/L	--
Sólidos Totales	--	20.17%
Sólidos Volátiles	--	19.31%

Además de los valores mostrados en las tablas anteriores, Viuda-Martos (2011) reporta que los residuos cítricos tienen un pH de 4.54 a 4.58 y 1.7 g /L de ácido cítrico.

Los residuos cítricos no tienen un valor agregado aun cuando su composición es alta en azúcares solubles, celulosa, hemicelulosa, pectina y aceites esenciales. Estos componentes son la base de varios procesos industriales para la realización de múltiples aplicaciones como fertilizantes, alimento animal, adsorbente de compuestos químicos, extracción de aceites esenciales y pectina, etc. (Rezzadori *et al.*, 2012).

#### **1.4. Industria ganadera**

En México, la producción de carne de bovino es de gran importancia socioeconómica, ya que ha sido el respaldo para el desarrollo de la industria nacional, por que proporciona alimentos y materias primas, divisas, empleo, distribuye ingresos en el sector rural y utiliza recursos naturales que no tienen cualidades adecuadas para la agricultura u otras actividades productivas. (Ruiz *et. al.*, 2009). La industria ganadera genera anualmente más de 50 000 empleos directos y supera los 500 000 indirectos. El valor de la producción es superior a los 21 mil millones de pesos anuales, con un valor de ventas de más de 26 millones de pesos. (Gallardo, 2006).

Como se puede observar, el sector ganadero es muy importante debido a que es una fuente de empleo considerable y es sustento en la economía nacional, además de que representa fuente de proteína de calidad sanitaria a precio accesible, lo que se traduce en bienestar social y mejoramiento de calidad de vida para las personas que se involucran en esta actividad.

##### **1.4.1. Problemática ambiental de los residuos bovinos**

Generalmente en México, la disposición final de los residuos de la industria ganadera y en especial las excretas bovinas es el secado al aire libre, sin recibir algún tipo de tratamiento adicional para mitigar los problemas medioambientales que conllevan, como la generación de olores desagradables que provocan malestares respiratorios y el desarrollo de vectores que son portadores de microorganismos que transmiten enfermedades infecciosas entre otros.

La generación de excretas bovinas es diferente en todos los sistemas productivos tanto nacionales como extranjeros. Según cálculos realizados a partir de estudios de Krich en el 2005, las vacas lecheras generan una media de 2 120 kg de excretas secas por animal al año, si se considera un contenido promedio de sólidos del 15%, se tiene una producción aproximada de 14 133 kg por animal al año o también 38.7 kg de excretas por animal al día. Este valor es similar al consultado por otras fuentes, de 40 L por animal al día (Brown *et al.*, 2007; USDA, 1992). A su vez Row y Neabel (2005) fijan en 1200 kg la producción de estiércol seco por animal al año en el caso específico de ganado bovino para la producción de carne.

Aunada a la elevada generación de excretas bovinas, la problemática es su alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, que pueden ser llevados mediante filtraciones a cuerpos de agua tanto en la superficie como en mantos acuíferos subterráneos. Estos contaminantes además de ser tóxicos para el ser humano también contribuyen al proceso de eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

#### 1.4.2. Características y propiedades de las excretas bovinas

Debido a circunstancias múltiples y diferentes en cada sistema de producción en el sector ganadero, las características de sus residuos varían de acuerdo al número de cabezas de ganado, la forma de alimentación (en paneles especiales o en el suelo), la frecuencia de lavado dentro de sus instalaciones, entre otras. Varios autores han caracterizado fisicoquímicamente éstos desechos, en la Tabla 1.5 se muestran los valores reportados en sus investigaciones.

Tabla 1.5. Caracterización de excretas bovinas.

Parámetro	Nasir <i>et al.</i> , 2013	Aragaw <i>et al.</i> , 2013	Lobato- Fuertes 2012	Satyanarayan <i>et al.</i> , 2008
pH	7.25	7.19	8.43	--
Sólidos Totales	189.8 mg/L	15.42%	233.7 g/L	8.50%
Sólidos Volátiles	34 mg/L	12.68%	174.5 g/L	74%
DQO	24.85 mg/L	--	133.5 g/L	115 mg/L
NH3-H	630 mg/L	--	1045.03 mg/L	--

De acuerdo a los parámetros que se observan en la tabla anterior, las excretas presentan un alto contenido de materia orgánica y por lo tanto su disposición final incorrecta produce elevados índices de contaminación, sin embargo las propiedades de estos desechos pueden aprovecharse de múltiples maneras y así minimizar su impacto ambiental.

### **1.5. Digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa, llamado biol.

El proceso controlado de digestión anaerobia es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero como se menciona anteriormente, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos, el mantenimiento y la mejora del valor fertilizante de los productos tratados. A pesar de presentar diversas ventajas, la digestión anaerobia puede ser inhibida por factores como:

- La temperatura: Comúnmente se presenta en dos intervalos, el mesofílico que va de 25 a 45 °C y el termofílico que va de 45 a 65° C.
- El pH: La conversión óptima de sustratos orgánicos en ambientes anaeróbicos ocurre a valores de pH neutros. Si bien, el dióxido de carbono ácido es uno de los productos finales de la digestión anaerobia, este compuesto necesita estar presente en el agua residual, ya que, la combinación de dióxido de carbono y de bicarbonato, resultan ser un buffer estable que mantiene el pH alrededor de 7.
- La agitación: Para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias, es decir mejorar su contacto.

- El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): El influente debe permanecer el tiempo necesario dentro del reactor, sometido a la acción de los microorganismos.
- La Carga Volumétrica Aplicada (CVA): Se refiere a la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de tiempo y volumen.

Otro factor importante que afecta la digestión de los RSC es la presencia de aceites esenciales, los cuales actúan como inhibidores del crecimiento bacteriano, es por ello que la codigestión con otro tipo de residuos y la extracción de los aceites es considerada para mejorar las condiciones en que se encuentran los microorganismos anaerobios. (Cendales, 2011).

#### **1.5.1. Etapas de la digestión anaerobia.**

El proceso de digestión anaerobia consiste principalmente en cuatro etapas:

##### **Hidrólisis**

Es el primer paso necesario para la degradación de la materia orgánica compleja. En esta etapa, las bacterias hidrolíticas actúan sobre las macromoléculas orgánicas despolimerizándolas enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. Así los lípidos son degradados por enzimas hidrolíticas (lipasas), a ácidos grasos de cadena larga. Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosomas, péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos (Lorenzo *et al.*, 2005).

##### **Fase acidogénica**

Los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior son transformados por las bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), alcoholes, amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos grasos volátiles son principalmente ácido acético, propiónico, butírico y valérico.

### **Fase acetogénica**

Mientras que algunos productos de la fermentación (hidrógeno y ácido acético), pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, los productos intermedios (ácido propiónico, butírico, etc.), necesitan ser transformados en productos más sencillos a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas.

Las bacterias acetogénicas también necesitan un control exhaustivo de la concentración de hidrógeno, ya que con una elevada presión de hidrógeno se reduce la formación de acetato, produciendo preferentemente ácido propiónico, butírico o etanol en vez de metano (Xiguang, 2010).

### **Fase metanogénica**

En la etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de este proceso son anaerobias estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas). La principal vía de producción de metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica (Lorenzo *et al.*, 2005).

#### **1.5.2. Productos de la digestión anaerobia**

Como ya se había mencionado, el proceso controlado de la digestión anaerobia genera dos productos principales que contienen propiedades que pueden ser aprovechados para múltiples actividades.

### 1.5.2.1. Biogás

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos a partir de las diferentes reacciones de biodegradación que sufre la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos así como de otros factores en ausencia de oxígeno. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente:

- 50-70% de metano ( $\text{CH}_4$ ).
- 30-40% de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ).
- $\leq 5\%$  de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), y otros gases.

Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico aproximadamente de  $5.5 \text{ Kcal/m}^3$  ( $6.4 \text{ KWh/m}^3$ ) (CIEMAT, 2007).

El biogás es un combustible ecológico que puede usarse a nivel doméstico o industrial, específicamente para quemadores, lámparas de biogás, estufas radiantes, incubadoras, refrigeradores o motores. Algunas de las aplicaciones del biogás se resumen en la Figura 1, como se muestra a continuación.

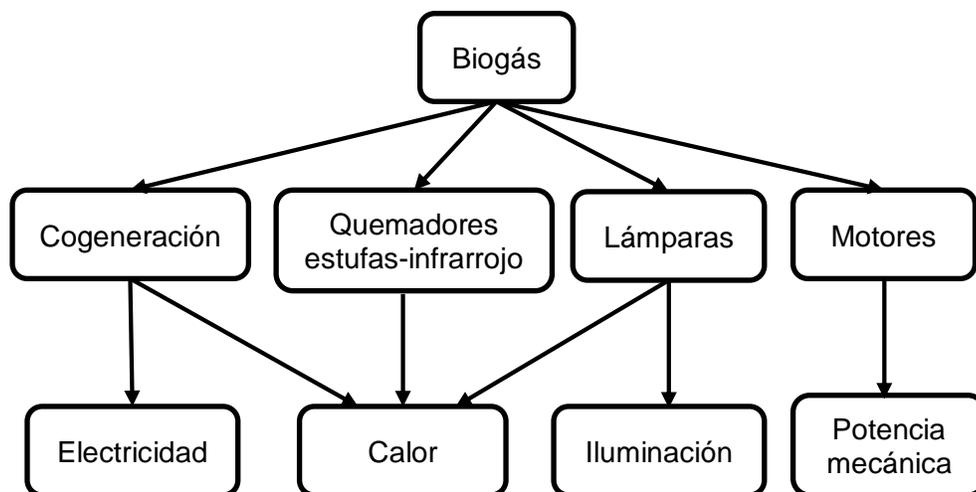


Figura 1.3. Aplicaciones del biogás

### 1.5.2.2. Biofertilizante

El efluente líquido que se genera en el proceso de digestión anaerobia, dependiendo del sustrato utilizado puede ser rico en nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y fitohormonas, es también llamado biol y puede ser utilizado como fertilizante ya que muestra varias ventajas a diferencia de los fertilizantes químicos como las que se citan a continuación: Debido a su pH (7-7.5) funcionan como corrector de acidez, eliminando el aluminio tóxico y liberando el fósforo de sus sales insolubles. Con la elevación del pH se dificulta el desarrollo de hongos patógenos. Posee partículas cargadas negativamente que intervienen en el cambio iónico y en la absorción superficial.

Su poder de fijación de sales es mayor que el de las arcillas, siendo responsable directo de la mayor parte de la nutrición de las plantas con hasta un 58% del total del intercambio de bases en el suelo. Su nivel de fijación es tan grande que evita la solubilidad y lixiviación excesiva de las sales, manteniéndolas en forma aprovechable para las plantas, cuyo delicado sistema radicular es el único que puede aprovechar estos nutrientes.

Mejora la estructura del suelo, dejándolo blando y facilitando la penetración de raíces. Estas raíces al introducirse profundamente resisten mejor los periodos de sequía. Estabiliza la aglomeración de partículas del suelo, logrando que resistan la acción disgregadora del agua, absorbiendo las lluvias más rápidamente, evitando la erosión y conservando la humedad por más tiempo. Favorece el desarrollo microbiano del suelo; la intensa actividad bacteriana fija nitrógeno atmosférico transformándolo en sales aprovechables (Groppelli, 2005).

Como se ha explicado la degradación anaerobia de la materia orgánica es un proceso complejo, en el que intervienen distintas poblaciones bacterianas. El resultado final es la generación de un gas en cantidad y composición variable con el tiempo. La concentración de metano en el biogás no sólo depende de la fase en que

se encuentre la degradación. Distintos sustratos originan distintas concentraciones de los componentes del biogás. Así, por ejemplo, la degradación de los lípidos genera un biogás con mayor concentración de metano que la degradación de la celulosa (Gunaseelan, 2007).

### **1.6. Codigestión de residuos orgánicos**

El término codigestión denomina la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La técnica de codigestión anaerobia permite el desarrollo eficiente del proceso debido al comportamiento sinérgico de los sustratos utilizados, los cuales compensan las deficiencias que cada uno presenta al realizar el proceso por separado. La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos biodegradables ha presentado excelentes resultados tanto en el rango termofílico como en el mesofílico (Brinkman, 2008).

La combinación eficiente de diferentes tipos de desechos orgánicos biodegradables puede incrementar la producción de biogás, además de incrementar el valor fertilizante del sustrato digerido por la conservación del contenido de nutrientes (Alvarez y Lidén, 2009). Adicionalmente la codigestión anaerobia puede reducir drásticamente el efecto de compuestos que resultan tóxicos e inhibitorios sobre el proceso.

La codigestión anaerobia ofrece muchos potenciales beneficios sobre el tratamiento y la utilización de residuos orgánicos biodegradable. En diversos estudios se resaltan las ventajas del proceso de codigestión anaerobia de los desechos bovinos y residuos agroindustriales como suero lácteo (El-Mashad y Zhang, 2010), y residuos del procesamiento de frutas y verduras. Dentro de estas ventajas se encuentra el aumento en la producción de metano, el cual suele atribuirse al aumento en la concentración de sólidos orgánicos presentes en el reactor o la satisfacción del requerimiento de algún nutriente específico necesario para el desarrollo de las poblaciones de microorganismos.

Como se ha mencionado anteriormente, los residuos sólidos orgánicos presentan en su mayoría compuestos lignocelulósicos, por lo que la codigestión de éstos con algún otro residuo orgánico biodegradable de origen agroindustrial como el estiércol bovino permite superar condiciones inhibitorias del proceso, como su biodegradabilidad tardía, pues las excretas bovinas contienen bacterias acondicionadas para el consumo de éstos compuestos difíciles de degradar, así como también la acidificación total del sustrato evidente durante la digestión anaerobia del residuo cítrico .

### **1.7. Reactores**

A través de los años los dispositivos en donde se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, es decir los biodigestores han sufrido diversos cambios de acuerdo al tipo de material disponible para su construcción, las condiciones ambientales y principalmente conforme al tipo de materia orgánica que se desea tratar. Actualmente existen plantas o sistemas de biodigestión de última tecnología contruidos de acuerdo a diferentes procesos de fermentación. A continuación se mencionarán los tipos de biodigestores o reactores anaerobios más utilizados hasta el momento en el campo de la investigación:

#### **1.7.1. Reactor de mezcla completa sin recirculación**

Es un reactor en donde se conserva una distribución uniforme de concentraciones de sustrato y microorganismos que generalmente contiene un sistema de agitación mecánico o manual. Este reactor es el más utilizado para la digestión anaerobia y generalmente proceso los residuos de manera estacionaria, por lo tanto el tiempo de retención es alto. (IDEA, 2007).

#### **1.7.2. Reactor de mezcla completa con recirculación.**

Este digestor también es llamada reactor anaerobio de contacto y es equivalente al sistema de lodos activados aerobios para el tratamiento de aguas residuales. Se caracteriza por tener un tiempo de retención menor que los reactores sin

recirculación y sólo se aplica cuando se desea tratar residuos con alto contenido orgánico.

### **1.7.3. Reactor con retención de Biomasa, sin recirculación.**

En este tipo de reactor se consideran dos variables de suma importancia, la primera es la aplicación de un soporte mediante filtros anaerobios y lechos fluidizados y la segunda es la adición de biomasa o floculación y la retención por gravedad tal y como ocurre en reactores de lecho de lodos. Debido a que retiene los microorganismos en el interior por más tiempo, tienen un tiempo de retención más bajo que los digestores de mezcla completa.

### **1.7.4. Reactor discontinuo.**

En este tipo de biodigestor, el biogás producido se encuentra ligado al crecimiento de los microorganismos, y se utiliza principalmente cuando los residuos presentan una alta concentración de sólidos que hacen dificultar la utilización de sistemas de bombeo.

### **1.7.5. Reactor en dos etapas.**

Este sistema consiste en dos reactores, el primero de ellos tiene un alto tiempo de retención que es en donde ocurre la hidrólisis, posteriormente pasa al segundo reactor en donde se digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa, por lo tanto el tiempo de retención es menor.

## **1.8. Digestor anaerobio**

El sistema del digestor anaerobio fue diseñado para el tratamiento de residuos sólidos urbanos vía anaerobia seca, está constituido por un tanque cilíndrico con fondo cónico que presenta una capacidad de  $0.25 \text{ m}^3$ , se divide en tres zonas por soportes horadados para la retención adecuada de la materia a degradar, el biogás y los lixiviados generados. También cuenta con una chaqueta de calentamiento la cual permite mantener la temperatura idónea para la codigestión.

El digester anaerobio fue operado por Romero-Figueiras en el año 2013 con una Carga Volumétrica Aplicada (CVA) en promedio de 1.54 Kg SV/m<sup>3</sup>d y con un contenido de Sólidos Totales (ST) que fluctuaban entre el 10 y 20 %. A continuación, en la Figura 1.4 se muestra el digester anaerobio ubicado dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba, en la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos.



Figura 1.4. Digester anaerobio.

Romero-Figueiras (2013) obtuvo eficiencias de remoción de Sólidos Volátiles que superaron un 38% de lo establecido por la NOM 004 (SEMARNAT, 2002) para obtener un biosólido de clase A, después de aplicar el tratamiento vía anaerobia semiseca a los sólidos orgánicos provenientes de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos municipales.

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para alcanzar los objetivos planteados, en este capítulo se describen las diversas actividades realizadas. En la Figura 2.1 se representa de manera esquemática la metodología experimental que se realizó para evaluar y analizar la codigestión de los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) y las Excretas de ganado Bovino (EB).

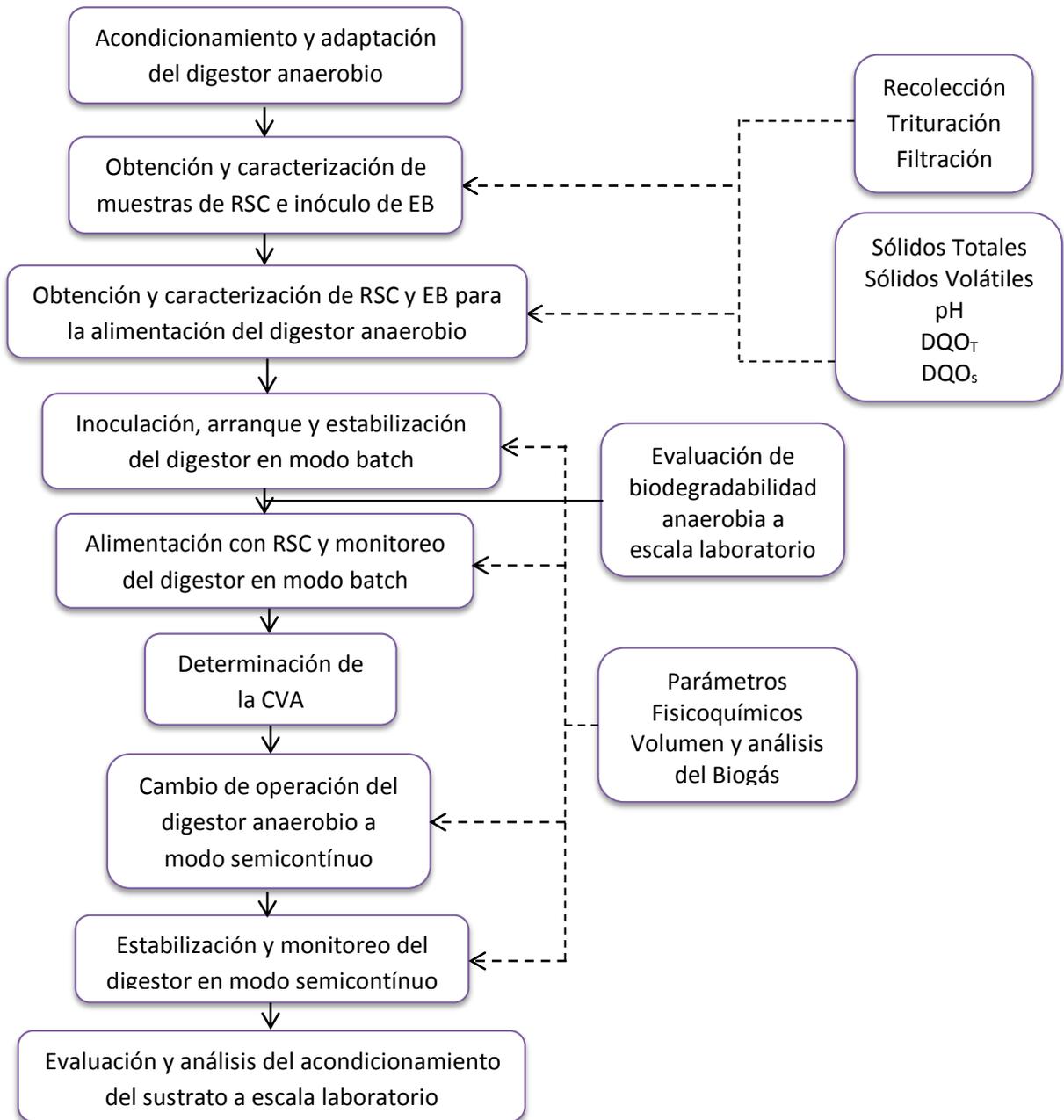


Figura 2.1. Esquema general de la metodología experimental

## 2.1. Acondicionamiento y adaptación del digestor anaerobio.

A continuación se describen las correcciones y adaptaciones que se le realizaron al Digestor Anaerobio:

- Se modificó la entrada de la alimentación.
- Se instaló un recipiente hermético en la salida de la parte inferior del digestor.
- Se acondicionó la chaqueta de calentamiento.
- Se colocó un dispositivo para almacenar el biogás mediante el desplazamiento de agua.

### 2.1.1. Características del digestor anaerobio.

El Digestor Anaerobio está fabricado en fibra de vidrio con un ¼" de espesor de acuerdo a las dimensiones y diseño del reactor. La fibra de vidrio se caracteriza por ser un aislante térmico además de ser inerte a diversas sustancias, así como también su tendencia a la maleabilidad, su resistencia a la deformación después de ser fabricado y soportar altas temperaturas. Los materiales y accesorios necesarios para su correcto funcionamiento se describen en la Tabla 2.1 (Romero-Figueiras, 2013).

Tabla 2.1. Materiales y accesorios utilizados en el Digestor Anaerobio.

Cantidad	Descripción	Función
5 piezas	Válvula bola de PVC ced. 80 de 0.5"	Paso de líquidos y gases
1 pieza	Válvula bola de PVC ced. 80 de 1"	Paso de líquidos para recirculación
2 piezas	Válvula bola de PVC ced. 80 de 2"	Alimentación y salida del sustrato
16 piezas	Tornillo de acero inoxidable de 0.5" de diámetro y 1.5 in de largo	Sujetar la tapa del digestor
8 piezas	Tornillo de acero inoxidable de 5/8" de diámetro y 1.5" de largo	Sujetar las bridas
2.3 Kg	Hule de neopreno de 3/8" AMV	Empaques para evitar fugas
1 pieza	Termostato automático	Control de temperatura

Además de los materiales descritos en la Tabla 2.1, fue necesario el uso de manguera comercial de 1/8" para el transporte de líquidos (alimentación, salida, recirculación, agua) y biogás. A continuación en la Tabla 2.2 se muestran las características generales del digestor anaerobio (Romero-Figueiras, 2013).

Tabla 2.2. Características del Digestor Anaerobio (DA).

<b>Especificaciones</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Material de fabricación	Fibra de vidrio	--
Espesor	0.00635	m
<i>Sección 1. Cuerpo del reactor</i>		
Diámetro interno del tanque	0.56	m
Altura del tanque	1.0	m
Volumen total del tanque	0.246	m <sup>3</sup>
<i>Sección 2. Fondo cónico del reactor</i>		
Diámetro interno	0.56	m
Altura del cono	0.042	m
Volumen total	0.004	m <sup>3</sup>
<i>Sección 3. Chaqueta de calentamiento</i>		
Diámetro	0.59	m
Anulo	0.025	m
Altura	0.76	m
Volumen total	0.02	m <sup>3</sup>
<b>Volumen total del digestor</b>	<b>0.25</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

## 2.2. Obtención y caracterización de muestras de RSC e inóculo de EB

Los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) se obtuvieron de una industria citrícola, ubicada al norte del Estado de Veracruz en el municipio de Martínez de la Torre. Después de las operaciones unitarias llevadas a cabo para la obtención de sus productos, la empresa conduce sus residuos hacia unas cribas en donde los sólidos remanentes del proceso son separados del efluente.

En la en la Figura 2.2, se observa la separación de los residuos sólidos, es en esta etapa en donde fueron obtenidos 1000 g de RSC para su posterior caracterización.



Figura 2.2. Separación de los RSC del efluente mediante cribas.

Los residuos se trasladaron al laboratorio del Instituto Tecnológico de Orizaba para su caracterización fisicoquímica inmediata. Se redujo el tamaño de partícula de los RSC ( $< 1 \text{ mm}$ ) con una licuadora convencional con el propósito de homogenizar y de esta manera evitar que los instrumentos de medición se obstaculizaran (Buffiere *et al.*, 2008), en la Figura 2.3 se muestra una de las diluciones preparadas con los RSC al 5%.



Figura 2.3. Dilución de los RSC para su caracterización.

El inóculo de Excretas Bovinas (EB) fue obtenido del interior de un reactor, el cual trata las excretas de ganado bovino diluidas, con un alto grado de remoción de materia orgánica (Alvarado-Lassmann *et al*, 2014), éste se ubica en un rancho ganadero de Orizaba, Veracruz. Las excretas bovinas presentaban un tamaño de partícula muy pequeño debido a su procedencia y por lo tanto su caracterización fue directa.

Las muestras fueron almacenadas a 4 °C, de acuerdo a la norma NMX-AA-052-1985 titulada “Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis”.

Ambas muestras fueron caracterizadas fisicoquímicamente, utilizando las determinaciones descritas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Determinaciones utilizadas para la caracterización de los RSC y EB.

Parámetro	Unidad	Método
pH	-	Potenciométrico
Sólidos Totales	%	2540 B Standar Methods
Sólidos Totales Volátiles	%	2540 E Standar Methods
Demanda Química Oxígeno Total	g/L	5220 D Standar Methods
Demanda Química Oxígeno Soluble	g/L	5220 D Standar Methods

### 2.3. Obtención y caracterización de RSC y EB para la alimentación del digester anaerobio.

Los residuos sólidos cítricos se obtuvieron a partir de la recolección de los desechos producidos en diversos locales dedicados a la venta de bebidas cítricas en los alrededores del Instituto Tecnológico de Orizaba. Con el propósito de obtener un sustrato semejante al procedente de la industria citrícola de acuerdo a las características que estas presentaron, fue necesaria la preparación y caracterización de 3 tipos de residuos (cáscaras, cáscaras con semillas y membranas, cáscaras con jugo).

De acuerdo a su característica sólida, fueron reducidos a un tamaño adecuado para su posterior trituración con agua destilada mediante una licuadora convencional como se muestra en la Figura 2.4, de esta manera fue posible caracterizar los RSC recolectados de acuerdo a la Tabla 2.3.



Figura 2.4. Muestreo de RSC

Las excretas bovinas fueron obtenidas del interior del mismo reactor anaerobio de geomembrana ubicado en el rancho ganadero, las cuales fueron caracterizadas nuevamente mediante las determinaciones antes mencionadas en la Tabla 2.3.

Fueron necesarios 160 L en total de excretas bovinas diluidas para el inóculo, 50 L se adquirieron del interior del reactor anaerobio de geomembrana mientras los 110 L restantes fueron obtenidos del tanque de alimentación de éste mismo biodigestor.

En la Figura 2.5 se observa el método de recolección. Las excretas se trasladaron hasta el Instituto Tecnológico de Orizaba y se caracterizaron por triplicado.



Figura 2.5. Obtención de excretas bovinas diluidas.

#### **2.4. Inoculación, arranque y estabilización del digester en modo batch.**

Posteriormente a la adaptación del digester anaerobio, éste se inoculó con los 160 L de excretas bovinas antes recolectados, con el propósito de que la comunidad bacteriana se acondicionara adecuadamente a las paredes del dispositivo. Después de la inoculación, el digester anaerobio se mantuvo en operación en modo batch durante 7 días. Al finalizar la fase de inoculación, se retiraron 140 L del digester anaerobio, dejando como remanente 20 L dentro de éste.

Para el arranque en el lote 1 fueron requeridos 200 L de excretas bovinas diluidas sin digerir. Se operó en modo batch y fue monitoreado durante 30 días. Al término del lote 1, el digester nuevamente fue vaciado dejando sólo 20 L de excretas en su interior.

Los siguientes lotes fueron de estabilización (2 y 3) y con éstos se utilizó el mismo procedimiento, es decir, antes de iniciar su operación, las excretas fueron retiradas, excepto 20 L y se alimentaban 200 L de excretas frescas. El lote 2 fue monitoreado por 30 días y el lote 3 por 31 días. Las excretas bovinas para estos lotes de arranque y estabilización fueron tomadas nuevamente del tanque de alimentación del biodigestor de geomembrana.

## 2.5. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia a escala laboratorio

Se realizaron pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio en matraces Erlenmeyer de 500 mL bajo condiciones mesofílicas, éstos fueron adaptados a un agitador orbital marca Labline.

### 2.5.1. Etapa 1

La etapa 1 consistió en evaluar la biodegradabilidad de las Excretas Bovinas (EB), su codigestión con los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) y la codigestión de los RSC con el Lodo proveniente de un Reactor de Lecho Granular Expandido (LEGSB) ubicado en la Planta de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos (PARSO) que se encuentra ubicada en el Instituto Tecnológico de Orizaba, éste reactor presentaba alta remoción de materia orgánica y es por ello que se decidió evaluar la codigestión del lodo con los RSC. Y como cuarta evaluación, una codigestión con los 3 compuestos antes mencionados. En la Tabla 2.4, se muestra la mezcla evaluada y el porcentaje utilizado del sustrato (RSC) y los inóculos (EB y LEGSB).

Tabla 2.4. Mezclas utilizadas en la etapa 1.

<b>Mezcla</b>	<b>Porcentaje (Sustrato / Inóculo)</b>
EB	100
EB + RSC	30 / 70
LEGSB + RSC	30 / 70
LEGSB + RSC + EB	35 / 30 / 35

Se implementaron 8 reactores anaerobios utilizando matraces Erlenmeyer de 500 mL cada uno, 4 de ellos eran exclusivos para obtener muestra, por lo tanto fueron sellados con un tapón de goma con 2 orificios de 0.5 cm de diámetro, en donde fueron conectadas 2 mangueras, una de 100 cm y una de 22 cm, para la salida de biogás y para la extracción de muestra respectivamente.

La manguera para la salida de biogás fue introducida 6 cm al matraz, mientras que la manguera de muestreo fue introducida hasta 1.5 cm antes de tocar el fondo del matraz. Los 4 matraces restantes fueron sellados mediante un tapón de goma con un orificio y una manguera de 100 cm, con el objetivo de obtener únicamente la producción de biogás sin extraer muestras. En la Figura 2.6 se observan las diferentes adaptaciones de los matraces.

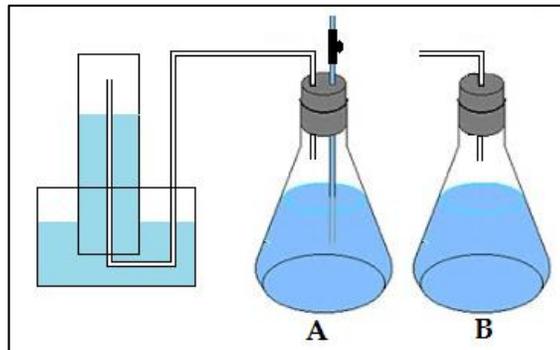


Figura 2.6. Matraces acondicionados para pruebas de biodegradabilidad.

En la Figura 2.6 se observa que el matraz A tiene 2 salidas, mientras que el matraz B sólo tiene una como antes ya se había mencionado. Ambos matraces se conectaron a un dispositivo de desplazamiento de agua para contabilizar el biogás producido, el agua utilizada fue ajustada a un pH de 5.5 con el propósito de que el  $\text{CO}_2$  se mantuviera en su forma libre y éste no se disolviera en el agua. En la Figura 2.7 se observan los matraces evaluados sobre el equipo de agitación.



Figura 2.7. Matraces evaluados en la etapa 1

Las pruebas de biodegradabilidad se monitorearon durante 15 días y se evaluó la remoción de materia orgánica y la cantidad de biogás producido, así como también la composición que éste presentaba mediante cromatografía de gases, los parámetros que se utilizaron para la evaluación fueron los antes mencionados en la Tabla 2.3, los cuales se describen más adelante en el apartado 2.11 de este capítulo.

### 2.5.2. Efecto del pH y la concentración de RSC en la codigestión con las EB

En esta etapa se realizó otro arreglo de las mezclas a evaluar, en donde las variables controladas fueron la relación inóculo/sustrato (EB/RSC) y el pH de las mezclas, las variables de respuesta al igual que la etapa 1 fueron la remoción de materia orgánica alcanzada en cada mezcla, la producción de biogás y la composición de este, a continuación en la Tabla 2.5 se muestra el arreglo de mezclas.

Tabla 2.5. Mezclas utilizadas para la evaluación del pH y concentración

Mezcla	Porcentaje (Sustrato / Inóculo)	pH
1	30/70	Sin ajustar
2	20/80	Sin ajustar
3	30/70	Ajustado
4	20/80	Ajustado

La primera mezcla (M1) contuvo 350 mL de EB (70%) y 150 mL de RSC (30%), la mezcla M2 contuvo 400 mL de EB (80%) y 100 mL de RSC (20%), las mezclas M3 y M4 se prepararon también de acuerdo a lo que se observa en la Tabla 2.5, sin embargo éstas dos últimas fueron ajustadas a un pH neutro con NaOH antes de ser selladas herméticamente.

Las mezclas fueron evaluadas y monitoreadas durante 15 días, se mantuvieron a una temperatura de 32 °C (rango mesófilo) y fueron montadas a un agitador orbital marca Labline.

Los matraces utilizados también fueron adaptados como en la etapa 1, es decir 4 de ellos eran para muestrear su contenido y los 4 restantes fueron únicamente para contabilizar el biogás producido. En la Figura 2.8 se observan los matraces evaluados sobre el agitador orbital.



Figura 2.8. Mezclas en el agitador orbital.

### 2.6. Alimentación con RSC y monitoreo del digestor en modo batch.

Al finalizar la etapa de estabilización con el Lote 3, se procedió a alimentar el digestor con los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) recolectados anteriormente de diversos locales dedicados a la venta de jugos de naranja establecidos cerca del instituto.

Debido a sus características inhibitorias (pH ácido) (Viuda-Martos, 2011) y a que las bacterias dentro del reactor no estaban aclimatadas a éste tipo de residuos, se decidió que el Lote 4 fuera alimentado con 90% de Excretas Bovinas (EB) frescas y 10% de RSC, además de ajustar pH con NaOH.

Después de haber obtenido los RSC, éstos fueron reducidos en tamaño, posteriormente se dejaron reposar durante 48 h para que los aceites esenciales presentes se colocaran en la superficie y así poder retirarlos. En la Figura 2.9 se muestran los residuos triturados (izquierda) con un líquido de color semejante al de los aceites esenciales derramados en la empresa citrícola (derecha).



Figura 2.9. Aceites esenciales presentes en los residuos cítricos.

El alto contenido de humedad contribuyó a que los RSC sólo requirieran 3 L de agua para su correcta homogenización y trituración con una licuadora convencional, se obtuvieron 22 L.

Para una relación de 90/10 dentro del digestor en el lote 4, se requirieron 198 L de excretas bovinas frescas y 22 L de RSC, se operó el digestor en modo batch durante 30 días, evaluando la remoción de materia orgánica, la cantidad de biogás producido y la composición de éste.

En el lote 5, la relación fue 80/20, se utilizaron 176 L de excretas frescas y 44 L de RSC preparados, es decir, triturados y homogenizados. La composición del lote 6 fue de 70/30, se utilizaron 154 L de excretas sin digerir y 66 L de RSC. En éstos lotes también fue necesaria la adición de NaOH para ajustar su pH.

### **2.7. Determinación de la Carga Volumétrica Aplicada (CVA)**

Posteriormente de operar y evaluar la codigestión de los RSC y las EB durante 6 lotes de 30 días cada uno, se decidió comprobar la adaptación de las bacterias dentro del digestor, de esta manera, al término del lote 6 no se volvió a alimentar el digestor y sólo se mantuvo la recirculación de éste.

Después de un periodo de 15 días, se procedió a alimentar el digestor con una relación de 80/20, sin embargo, esta vez no se alimentó con excretas bovinas frescas y se utilizaron 176 L de la mezcla que estaba en el interior del digestor, es decir se retiraron sólo 44 L de la mezcla del lote 6, los cuales fueron repuestos posteriormente con RSC recién preparados.

En esta fase, el digestor anaerobio fue monitoreado durante 5 días evaluando los mismos parámetros fisicoquímicos antes mencionados. Al término de este lote se procedió a retirar nuevamente 44 L de la mezcla y se repusieron con 44 L de RSC frescos, sin embargo ésta fase se mantuvo monitoreada durante 10 días para poder observar la curva de degradación de materia orgánica.

En la Figura 2.10 se muestran los residuos sólidos cítricos triturados (izquierda) y preparados (derecha) para la alimentación del digestor.



Figura 2.10. Residuos sólidos cítricos utilizados para la alimentación del digestor.

En total se realizaron 4 lotes de alimentación con un composición 80/20 (EB/RSC), es decir un lote de 5 días y tres lotes de 10 días cada uno. Al término de las fases antes descritas se procedió a determinar la carga volumétrica aplicada de acuerdo a las remociones de materia orgánica que se alcanzaron.

## 2.8. Cambio de operación del digester anaerobio a modo semicontínuo

Una vez establecida la Carga Volumétrica Aplicada (CVA), se procedió a cambiar el modo de operación. Los parámetros de monitoreo fueron los mismos que anteriormente se determinaron, sin embargo, ésta vez los muestreos fueron 2, es decir, de la alimentación y de la salida, estableciendo de manera diaria las remociones alcanzadas.

### 2.8.1. Adaptación de la alimentación

Para la alimentación del digester se recolectaron y prepararon RSC, se caracterizaron de manera inmediata antes de ingresarlos al digester y una vez que se determinó su concentración de materia orgánica (DQO Total), se calculó el volumen de RSC a utilizar de acuerdo al volumen útil del reactor y los gramos de DQO Total que se encontraban en su interior, de esta manera el digester se mantuvo en operación durante 10 días alimentándolo cada 24 horas.

### 2.8.2. Alimentación en modo semicontínuo

Después de evaluar la adaptación del digester se decidió disminuir el porcentaje de los RSC a un 10%, es decir que para la alimentación en semicontínuo cada día se retiraron 22 L y fueron repuestos con RSC diluidos de acuerdo a la Ecuación 2.1.

$$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2 \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

En donde:

C1 = Concentración de materia orgánica requerida de los RSC.

V1 = Volumen requerido para alimentar el reactor.

C2 = Concentración de materia orgánica determinada a los RSC antes de ingresarlos el digester anaerobio.

V2 = Volumen de RSC necesarios para alimentar el digester.

Despejando el volumen necesario de RSC se tiene la Ecuación 2.2

$$V2 = \frac{C1 \cdot V1}{C2} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Cuando el volumen requerido de RSC resultaba menor al establecido en V1, se le adicionaba agua al V2 hasta alcanzar los litros necesarios para alimentar el digestor anaerobio.

### **2.9. Estabilización y monitoreo del digestor anaerobio en modo semicontínuo**

La operación en modo semicontínuo se llevó a cabo durante 10 días, en los cuales las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos se realizaron de manera diaria, es decir que cada día se utilizaba el método de dilución antes descrito en el punto 2.8.2.

### **2.10. Evaluación y análisis del acondicionamiento del sustrato a escala laboratorio**

Al finalizar la operación en modo semicontínuo, se suspendió la alimentación del digestor anaerobio por un periodo de 30 días con la finalidad de que la comunidad bacteriana se adaptara nuevamente y esta redujera al máximo la carga orgánica que aún estaba presente dentro del reactor.

El digestor se mantuvo en agitación de manera constante durante este lapso sin alimentarlo, posteriormente en el día 31 se retiraron 3 L del contenido del reactor para determinar sus características además de evaluar su acondicionamiento para digerir los residuos sólidos cítricos, de esta manera se adaptaron nuevamente 8 mezclas de diferentes proporciones con RSC y el inóculo esta vez fue el contenido retirado del digestor anaerobio. Se utilizaron matraces de 500 mL de la misma forma en la que se describen anteriormente en el apartado 2.5. En la Tabla 2.6 se muestran las mezclas utilizadas.

Tabla 2.6. Mezclas para la evaluación del acondicionamiento

<b>Mezcla</b>	<b>Porcentaje (Inóculo / RSC)</b>
1	50/50
2	60/40
3	70/30
4	80/20

El pH fue ajustado a un rango de neutralidad con NaOH, las mezclas fueron muestreadas cada 2 días para determinar sus parámetros fisicoquímicos, sin embargo la producción de biogás fue monitoreada de manera constante durante los 15 días que duró la evaluación.

### **2.11. Análisis y determinación de parámetros fisicoquímicos**

A continuación se describen las determinaciones analíticas realizadas en el Laboratorio Ambiental 1 (LA1), el cual se ubica dentro del instituto.

#### **2.11.1. Determinación de pH**

El principio básico de la medida electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medición potenciométrica usando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia.

Se determinó el de pH (método potenciométrico 4500-H<sup>+</sup> B standard methods) de manera diaria.

#### **2.11.2. Determinación de DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>s</sub>**

Una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio.

Después de la digestión, el dicromato no reducido se mide por titulación o espectrofotométricamente para determinar la cantidad de dicromato consumido y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente. En la Figura 2.11 se muestra el equipo que fue utilizado en esta determinación analítica.



Figura 2.11. Centrífuga, placa digestora y espectrofotómetro utilizados

Se determinó DQO Total ( $DQO_T$ ) y DQO Soluble ( $DQO_S$ ) mediante el Micro método colorimétrico 5220 Standard Methods. El porcentaje de remoción de la DQO se calculó con la Ecuación 2.3.

$$\% \text{ Remocion } DQO = \frac{DQO \text{ entrada} - DQO \text{ salida}}{DQO \text{ salida}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

En la Figura 2.12 se observa una de las diluciones realizadas a los residuos sólidos cítricos ya que debido a su tamaño estos no podían ser analizados directamente (Buffiere *et al.*, 2008) Para la  $DQO_T$  se utilizó una alícuota tomada directamente de la dilución y para la  $DQO_S$ , la dilución fue centrifugada y sólo fue utilizado el sobrenadante.



Figura 2.12. Diluciones de los RSC para determinar DQO

### 2.11.3. Determinación de ST y STV

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenida en aguas residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o sin filtrar, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.

Se determinó Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV) por el método gravimétrico (2540 B Standar Methods y 2540 E Standar Methods). El porcentaje de remoción de ST se calculó con la Ecuación 2.4 y los STV con la Ecuación 2.5.

$$\% \text{ Remoción ST} = \frac{ST \text{ entrada} - ST \text{ salida}}{ST \text{ salida}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

$$\% \text{ Remoción STV} = \frac{STV \text{ entrada} - STV \text{ salida}}{STV \text{ salida}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Para la determinación de los ST y los STV se utilizaron los equipos que se muestran en la Figura 2.13



Figura 2.13. Balanza analítica, estufa y mufla utilizadas.

En la Figura 2.14 se observan los crisoles con las muestras calcinadas de los residuos en estudio.

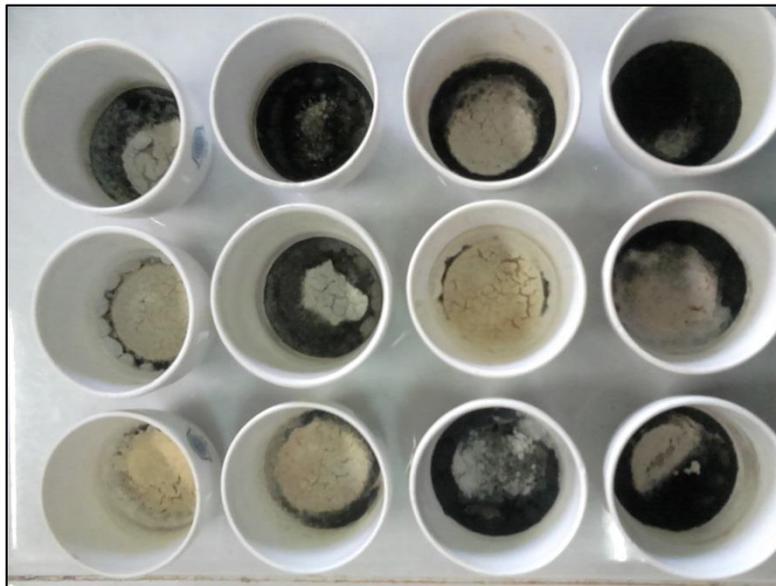


Figura 2.14. Muestras de RSC y EB calcinadas

#### 2.11.4. Composición de Biogás

Para la determinar la composición del biogás se utilizó un cromatógrafo de gases BuCK 310 con detector de conductividad térmica y columna empacada All Tech CTR-I, utiliza Helio a una presión de 70 psi como gas de arrastre, la temperatura de la columna es de 36°C y la del detector es de 121°C, la dosis analizada es de 2 mL por inyección. En la Figura 2.15 de muestra el equipo utilizado.



Figura 2.15. Cromatógrafo de gases utilizado.

#### 2.11.5. Carga Volumétrica Aplicada (CVA)

Éste parámetro se comenzó a usar cuando se realizó el cambio de operación al digestor anaerobio. Es necesario mantener un control de la carga volumétrica aplicada, la cual se calcula con los datos de volumen útil del reactor, volumen de alimentación y la concentración de la materia orgánica del parámetro de DQO (Ecuación 2.6).

$$CVA = \frac{\text{Volumen de alimentación} \left( \frac{L}{d} \right) \cdot \text{Concentración} \left( \frac{gDQO}{L} \right)}{\text{Volumen util de Reactor} (L)} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

## **CAPÍTULO 3**

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante las etapas experimentales planteadas en la metodología.

### 3.1. Acondicionamiento y adaptación del digestor anaerobio.

- Se modificó la entrada de la alimentación al digestor, utilizando un niple y un codo de 90°, (ambos con rosca) de PVC cédula 80, estos fueron conectados directamente a la válvula de alimentación, la cual mide 2". Se introdujo un embudo desmontable, ésto con la finalidad de evitar el uso de bombas o tener que abrir el digestor cada vez que se iniciara un nuevo lote de alimentación.
- Se instaló un recipiente hermético de 20 L en la salida de la parte inferior del digestor (válvula de 1"), éste mismo recipiente contaba con una salida a la cual se le instaló una manguera para que por medio de esta se recirculara el sustrato y así el digestor fuera constantemente mezclado de manera correcta, fue necesario el uso de una bomba peristáltica para su recirculación. En la manguera de recirculación fue instalada una válvula con el fin de muestrear el sustrato.
- Se acondicionó la chaqueta de calentamiento mediante la instalación de un recipiente con capacidad de 25 L, para la recirculación del agua fue instalada una bomba sumergible con capacidad de 600 L/h y un termostato automático para regular la temperatura a 30 °C.
- Se colocó una manguera en la salida del biogás con una válvula check comercial al final de ésta, la cual sólo permite la salida del biogás y evita la entrada de cualquier líquido. La manguera fue introducida a un recipiente de 20 L para la cuantificación del biogás mediante el desplazamiento del agua.

A continuación en la Figura 3.1 se observa de manera esquemática el Digestor Anaerobio (DA) con las modificaciones realizadas.

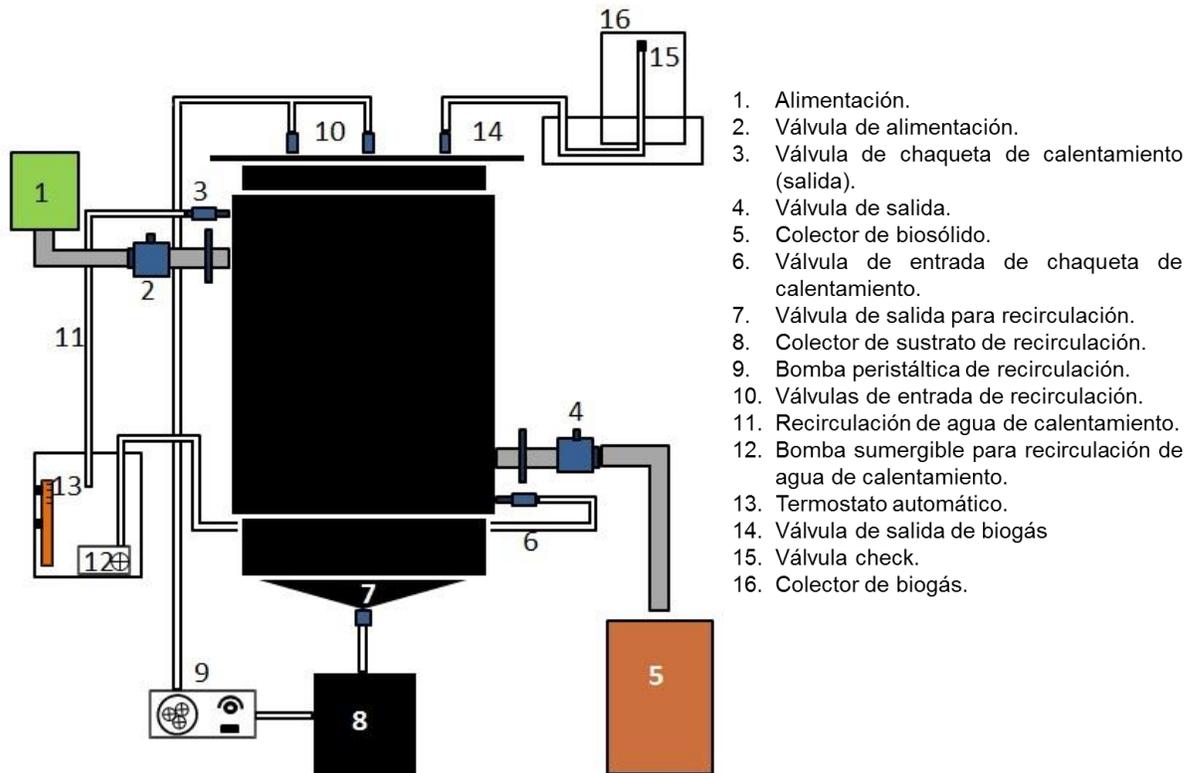


Figura 3.1. Esquema general del Digestor Anaerobio (DA)

### 3.2. Obtención y caracterización de muestras de RSC e inóculo de EB

La caracterización de cada sustrato fue por triplicado, en la Tabla 3.1 se muestra el promedio de los resultados de los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) y de las Excretas Bovinas (EB).

Tabla 3.1. Características de las muestras.

Parámetro	EB	RSC
DQO Total (g/L)	7.54	54.11
DQO Soluble (g/L)	3.43	32.96
ST (g/L)	5.14	61.22
STV (g/L)	3.13	57.85
STV/ST	0.6	0.94
pH	7.81	4.46

Como se observa en la Tabla 3.1 el inóculo a base de excretas bovinas extraído del interior del reactor de geomembrana presentó un pH por encima de la neutralidad, lo cual concuerda con los estudios de Nasir *et al.* (2013), Aragaw *et al.* (2013) y Lobato-Fuertes (2012). Los residuos sólidos recolectados en la industria cítrica presentaron un pH ácido más bajo que el reportado por Koppa *et al.* (2013) pero más alto que el caracterizado por Martín *et al.* (2010).

Respecto a los sólidos totales y sólidos totales volátiles, existe una gran diferencia entre los dos sustratos y por lo tanto también en la DQO. Los sólidos de las excretas bovinas resultaron muy bajos considerando a los sólidos de los residuos cítricos, esto es debido a la operación del reactor de geomembrana, ya que las excretas bovinas pasan por un proceso de separación de sólidos y una dilución de 1:3 antes de que el reactor sea alimentado (Alvarado-Lassmann, 2014), es decir que por cada porción de excretas bovinas, los operadores del reactor agregaban 3 porciones de agua antes de alimentar, por lo tanto el inóculo que fue obtenido del interior del reactor de geomembrana fue prácticamente una solución líquida.

La DQO de los residuos sólidos cítricos es mucho mayor en comparación con las excretas bovinas, esto indica una elevada carga orgánica debido a los múltiples compuestos como carbohidratos y material lignocelulósico (Cerón-Zalazar *et al.*, (2011).

### 3.3. Obtención y caracterización de RSC y EB para la alimentación del Digestor Anaerobio.

Después de la recolección, preparación y caracterización de los 3 diferentes RSC, el residuo que presentó mayor similitud al obtenido de la industria citrícola fue el de las cáscaras con semillas y membranas, cada tipo de residuo fue analizado por triplicado.

En la Tabla 3.2 se muestran las características que presentaron los materiales obtenidos a partir de la determinación de parámetros fisicoquímicos en el laboratorio.

Tabla 3.2. Características del inóculo (EB) y sustrato (RSC)

Parámetro	EB	RSC
DQO Total (g/L)	7.83	58.95
DQO Soluble (g/L)	4.22	37.41
ST (g/L)	4.32	73.56
STV (g/L)	3.59	66.89
pH	7.45	4.12

Como se observa en la tabla anterior, las excretas bovinas tuvieron resultados cercanos a la primera caracterización ya que fueron obtenidas del mismo reactor de geomembrana, sólo que en esta ocasión las excretas se obtuvieron del tanque de alimentación y no del interior.

Los RSC recolectados obtuvieron valores semejantes a los residuos sólidos de la industria citrícola, sin embargo, el pH de los residuos recolectados fue más ácido pero ésta vez coincidió con el rango de pH que estableció Martín *et al.* (2010). La DQO de los residuos cítricos recolectados fue más alta que la DQO de los residuos sólidos de la industria citrícola.

### 3.4. Inoculación, arranque y estabilización del digester en modo batch

Para la inoculación del digester anaerobio se utilizaron 160 L de excretas bovinas. La operación fue en modo batch y duró 7 días. Para el Lote 1 las excretas alimentadas consistieron en 20 L de remanente del inóculo y 200 L de excretas frescas, se operó durante 30 días y al finalizar su evaluación se retiraron sólo 200 L, éste proceso también se utilizó para los lotes de estabilización 2 y 3.

Uno de los parámetros que indican de manera inmediata el funcionamiento del digester es el pH (Kaparaju *et al.*, 2006). Para el correcto funcionamiento de la digestión anaerobia es necesario un pH neutro, en la Figura 3.2 se observa el monitoreo diario del pH durante los días de inoculación, el lote de arranque y los lotes de estabilización.

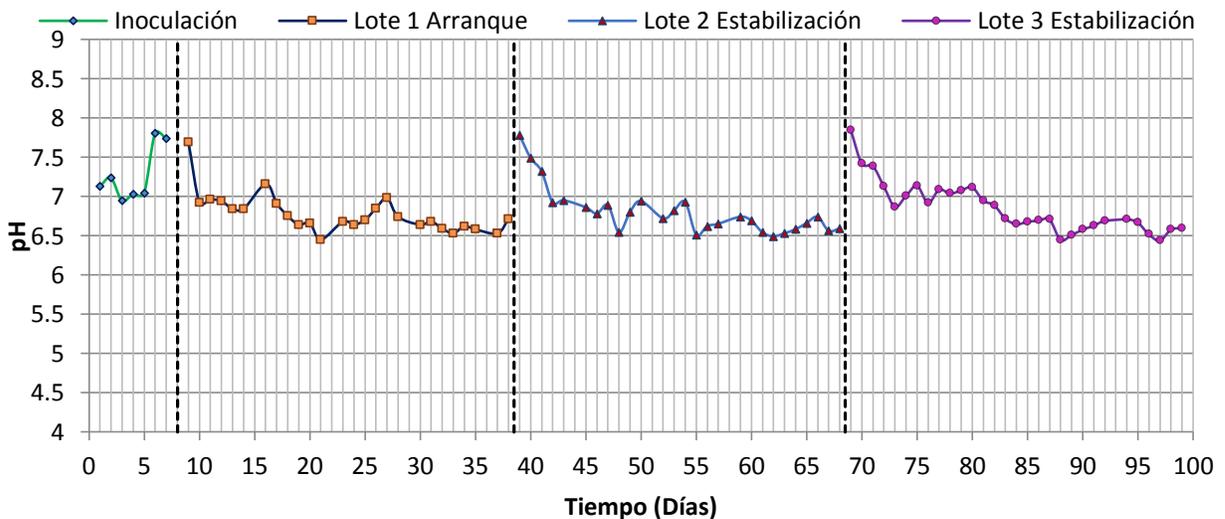


Figura 3.2. Comportamiento del pH

Como se puede observar en la Figura 3.2, el pH se mantuvo en un rango de neutralidad, iniciando cada lote con un pH ligeramente elevado y a medida que transcurre el tiempo éste baja sin causar la inhibición del proceso, es decir que las excretas bovinas presentan un pH favorable para la codigestión con los residuos sólidos cítricos (Wilkins *et al.*, 2010)

La Demanda Química de Oxígeno Total y Soluble ( $DQO_T$  y  $DQO_S$ ), fue determinada diariamente. En la Figura 3.3 se observa su disminución de manera gradual.

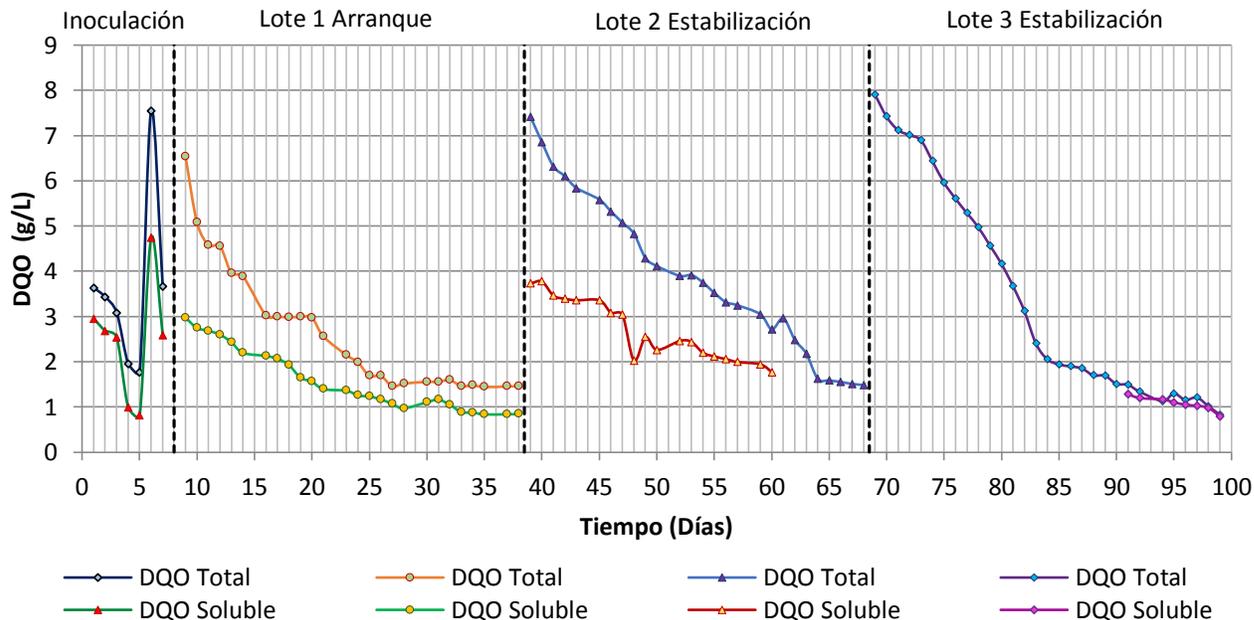


Figura 3.3. Comportamiento de la DQO total y soluble.

En la Figura 3.3 se puede observar la remoción de materia orgánica a medida que transcurren los días de cada lote. Las excretas bovinas alimentadas al digestor anaerobio en cada lote tuvieron una  $DQO_T$  en promedio de 7.35 g/L y una  $DQO_S$  en promedio de 3.8 g/L, excepto en el lote de inoculación ya que se observa un aumento de la DQO en el día 6, esto se produjo debido a que en los lotes 1, 2 y 3 se alimentó con excretas frescas y en el lote de inoculación las excretas fueron tomadas del interior del biodigestor de geomembrana, es decir que estaban a la mitad de su degradación y al día 5 su DQO estaba por debajo de un 1g/L, por lo tanto en el día 6 se tuvo que retirar parte de las excretas (60 L) y éstas fueron reemplazadas por excretas frescas, sin embargo en el día 7 se observa nuevamente su degradación.

En la Figura 3.4 se muestra la determinación diaria de los Sólidos Totales (ST) y los Sólidos Totales Volátiles (STV).

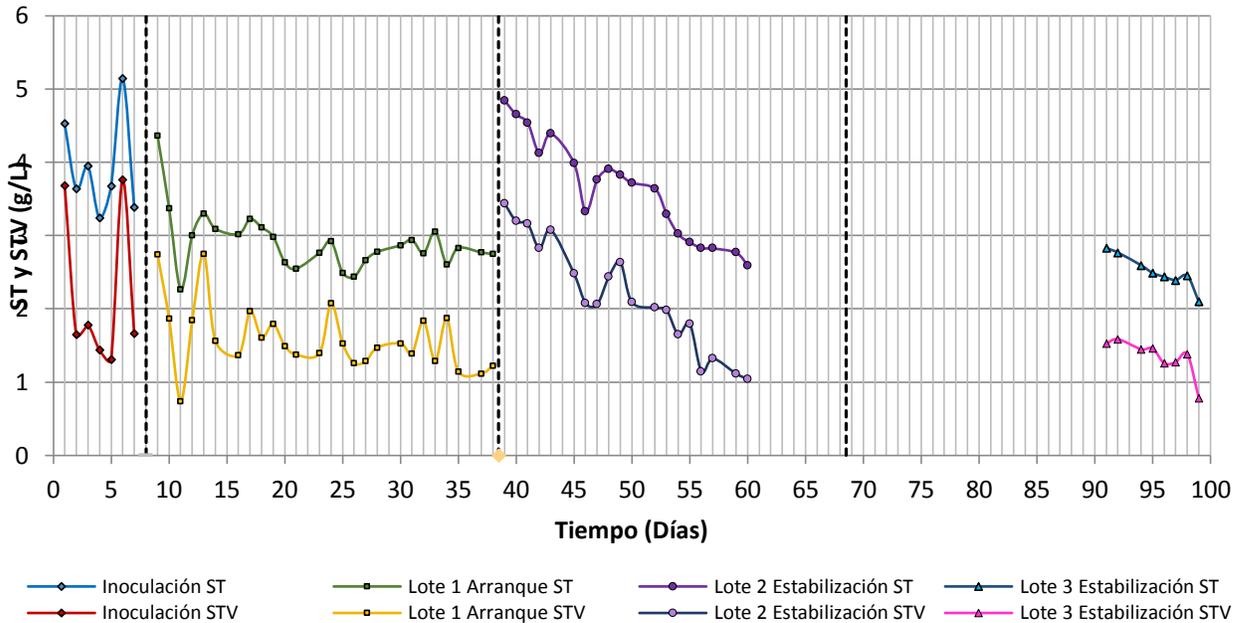


Figura 3.4. Comportamiento de los Sólidos Totales y Volátiles.

Los sólidos contenidos en el digestor anaerobio también son un parámetro que indica la remoción gradual durante la digestión. Las excretas bovinas alimentadas presentaron alrededor de 4.6 g/L en promedio de Sólidos Totales (ST) y alrededor de 3.08 g/L de Sólidos Totales Volátiles (STV). En estas determinaciones se puede corroborar la adición de 60 L de excretas frescas en el día 6 debido a su rápida remoción.

En el periodo del día 60 al día 90, la determinación de parámetros como la DQO<sub>s</sub>, los ST y los STV no pudo ser efectuada debido a un percance de carácter técnico en la electricidad dentro de la institución. Sin embargo el proceso de digestión no fue interrumpido en éstos 30 días y se logró monitorear el pH y la DQO<sub>T</sub>.

La cuantificación del biogás producido fue de manera diaria durante los lotes y se puede observar su comportamiento en la Figura 3.5.

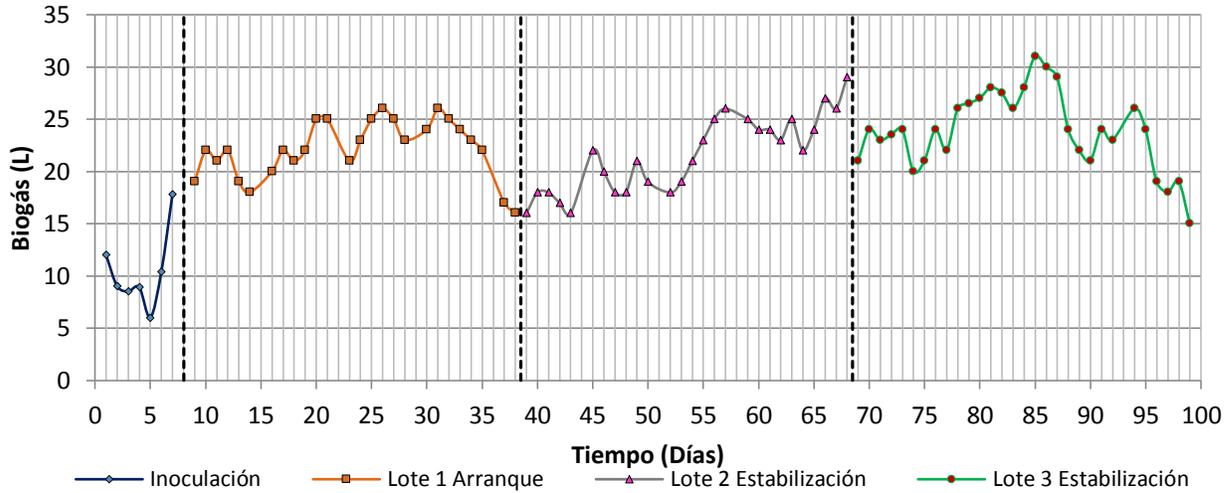


Figura 3.5. Producción diaria de biogás.

En la Figura 3.5 se muestra que la producción de biogás fue continua y desde la etapa de inoculación ésta comenzó a desplazar agua del dispositivo de cuantificación. En el lote 1 de arranque, la generación de biogás fue en aumento hasta llegar a una producción de 26 L. En el lote 2 la producción máxima fue de 29 L y en el lote 3 la producción más alta fue de 31 L. En la Figura 3.6 se muestra el porcentaje de CH<sub>4</sub> contenido en el biogás, éste fue analizado mediante cromatografía de gases para determinar su composición.

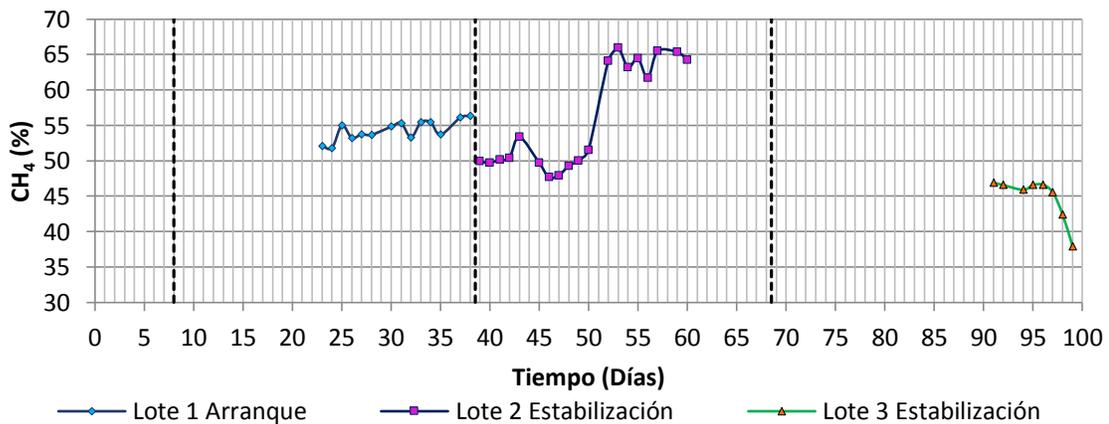


Figura 3.6. Porcentaje de CH<sub>4</sub> durante la producción de biogás.

La composición del Biogás producido durante la digestión fue determinada a partir del día 15 en el lote 1, es decir a la mitad de éste. En el lote 2 de estabilización se aprecia que el porcentaje de metano llega al 65%. En el periodo comprendido entre el día 60 y el 90 no fue posible determinar la composición de biogás. En la Tabla 3.3 se muestra la cantidad de biogás acumulado durante los días de operación en cada lote y los rendimientos de metano obtenidos.

Tabla 3.3. Biogás acumulado en cada lote y rendimientos de metano

Lote	Operación (Días)	Biogás acumulado (L)	y mínimo (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>Trem</sub> )	y máximo (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>Trem</sub> )
Inoculación	7	72.6	-	-
1. Arranque	30	659	0.20854	0.33767
2. Estabilización	30	647	0.14909	0.34786
3. Estabilización	31	741	0.13731	0.32222

De acuerdo a la Tabla 3.3 se observa que el lote con mayor producción de biogás acumulado fue el número tres de estabilización con 741 L, mientras que en la inoculación sólo se obtuvieron 72.6 L. En la Figura 3.8 se observan los días en los que fue posible determinar la composición del biogás y por lo tanto sólo en esos días pudo determinarse el rendimiento de metano, en esa misma figura se aprecia que el porcentaje de metano fluctuaba conforme al paso del tiempo y de esta manera los rendimientos de metano que fueron obtenidos eran diferentes cada día, por lo tanto en la tabla anterior sólo se reportan los valores mínimos y máximos del rendimiento de metano que se obtuvieron en cada lote.

### 3.5. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia a escala laboratorio

A continuación se describen los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la evaluación de la biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio.

#### 3.5.1. Etapa 1

En esta etapa se llevó a cabo la evaluación de la biodegradabilidad de 4 diferentes mezclas a escala laboratorio durante 15 días en modo batch, las mezclas tuvieron un total de 500 mL y cada una de ellas fue adaptada a un dispositivo anaerobio que a su vez estaba montado en un agitador orbital. En la Figura 3.7 se pueden observar las curvas de degradación de la DQO<sub>T</sub> en cada mezcla.

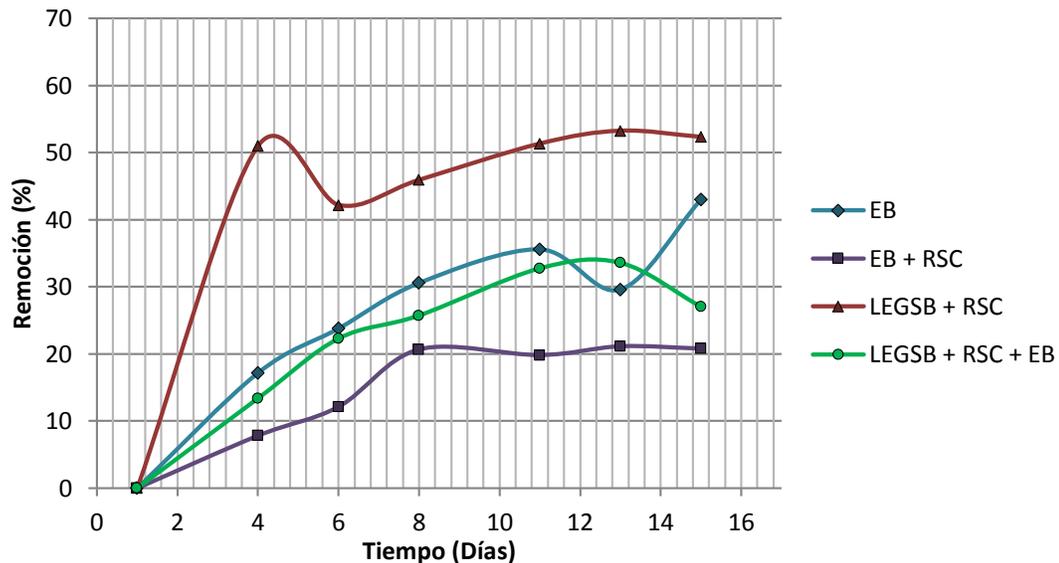


Figura 3.7. Degradación de la DQO Total en la Etapa 1

Como se puede observar, la mezcla que tuvo mayor porcentaje de remoción fue la mezcla de LEGSB+RSC (Mezcla 3), y la mezcla que presentó una inhibición a los 8 días fue la mezcla de EB+RSC (Mezcla 2) ésto se puede comprobar mediante los resultados que se muestran a continuación en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Degradación de la DQO Total en la Etapa 1

Mezcla	Composición	DQO Total Inicial (g/L)	DQO Total Final (g/L)	DQO Total Removida (g/L)	DQO REAL Removida	DQO Total Removida (%)
1	EB	7.542	4.535	3.0071	1.50355	39.87
2	EB + RSC	7.133	5.421	1.7116	0.8558	24.00
3	EGSB + RSC	86.69	33.66	53.0277	26.51385	61.17
4	EGSB + RSC + EB	32.22	20.66	11.555	5.7775	35.86

Como se puede observar en las mezclas 1 y 2 la DQO Inicial fue casi la misma sin embargo los RSC presentes en la mezcla 2 inhibieron el proceso de digestión y la mezcla sólo logro degradar el 24%. La mezcla que presentó mayor degradación fue la número 3 compuesta por el lodo de un reactor EGSB y los RSC (50/50) y durante el periodo de evaluación el pH se mantuvo en el rango de la neutralidad permitiendo que la digestión no fuera inhibida. La mezcla 4 que contenía los 3 materiales en estudio sólo logro degradar el 35% de la DQO Total a pesar de que su DQO Total inicial fuera mucho menor que en la mezcla 3.

Al término de la evaluación en la etapa 1 se determinó la composición del biogás producido por medio de cromatografía de gases y de acuerdo a los litros producidos en cada mezcla se pudo calcular la cantidad de metano generado en la digestión. Mediante la relación del metano producido y los gramos removidos de la DQO Total se pudo determinar el rendimiento de metano ( $\gamma$ ) de cada mezcla el cual se observa a continuación en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Composición del biogás y rendimiento de metano en la Etapa 1

Mezcla	Biogás producido (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (L)	$\gamma$ (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>rrem</sub> )
EB	0.39	55.131	0.215	0.143
EB + RSC	0.37	37.983	0.141	0.164
EGSB + RSC	1.35	65.427	0.883	0.033
EGSB + RSC + EB	1.38	65.682	0.906	0.157

De acuerdo a la tabla anterior, se logra apreciar que aun cuando la mezcla 3 presentó una elevada remoción de materia orgánica y un alto porcentaje de metano ésta sólo obtuvo un rendimiento de metano de 0.033 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> ya que produjo únicamente 1.35 L de biogás a pesar de haber removido más de 26 g de DQO real, ésto ocasionó que obtuviera el rendimiento de metano más bajo.

En el caso de la mezcla 2, a pesar de que fue inhibida debido a su acidificación ésta obtuvo el mayor rendimiento de metano, por lo que sí es considerable la codigestión de los RSC con las excretas bovinas cuidando que el medio no se acidifique, es por ello que el estudio de la biodegradabilidad de estos residuos en conjunto fue realizada en la siguiente etapa evaluando su comportamiento con el pH ajustado y sin ajustar.

### 3.5.2. Efecto del pH y la concentración de RSC en la codigestión con las EB

El objetivo de esta segunda etapa fue evaluar el efecto del pH y la concentración de RSC en la codigestión con las EB, debido a que estos dos factores son importantes para el correcto crecimiento de la comunidad bacteriana y por lo tanto para que se lleve a cabo la digestión de manera adecuada (Kaparaju, 2006; Sowmeyan, 2008), en la Figura 3.8 se puede observar el comportamiento del pH durante la evaluación en cada mezcla.

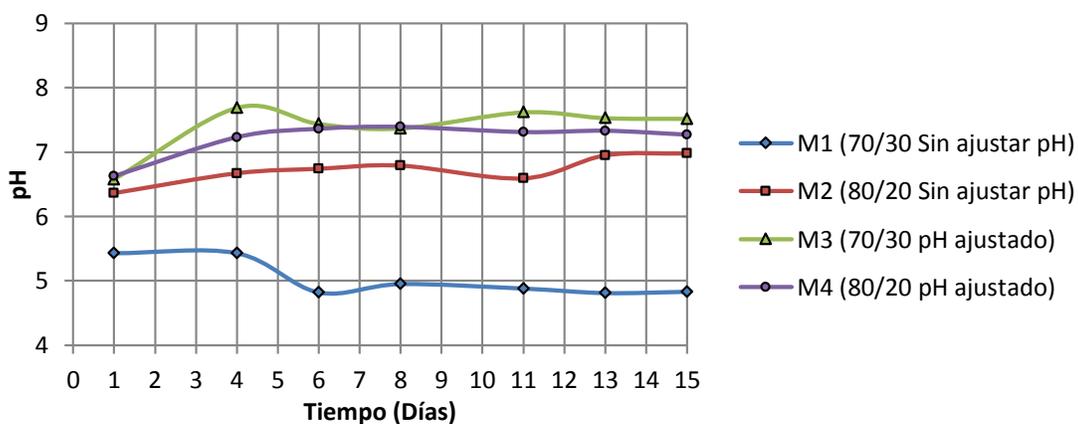


Figura 3.8. Monitoreo del pH durante la evaluación

En la figura anterior se logra apreciar que la mezcla M1 que contenía el 30% de RSC se inhibió desde el inicio llegando a presentar un pH de 5.43 al inicio, éste se mantuvo hasta el día 6 en donde su inhibición fue más notable llegando a pH de 4.83 al final de la evaluación, es decir que el 70% de las excretas en esta mezcla no logró amortiguar el pH y se mantuvo en un rango ácido.

La mezcla que mostró una elevación de pH fue la número 2 a pesar de no haber sido ajustada ésta logró recuperarse por sí sola, acercándose cada día a la neutralidad, la mezcla inició con pH sin ajustar de 6.36 y logró elevarse hasta 6.98. En las mezclas M3 y M4 el pH inicial fue de 6.58 y 6.63 respectivamente el cual se elevó por encima de 7 durante todo el periodo de codigestión, finalizando con un pH de 7.52 y 7.27 correspondientemente.

En la Figura 3.9 se observa la comparación de las curvas de degradación de la DQO Total de las 4 mezclas con la degradación que presentaron las excretas bovinas en la etapa 1.

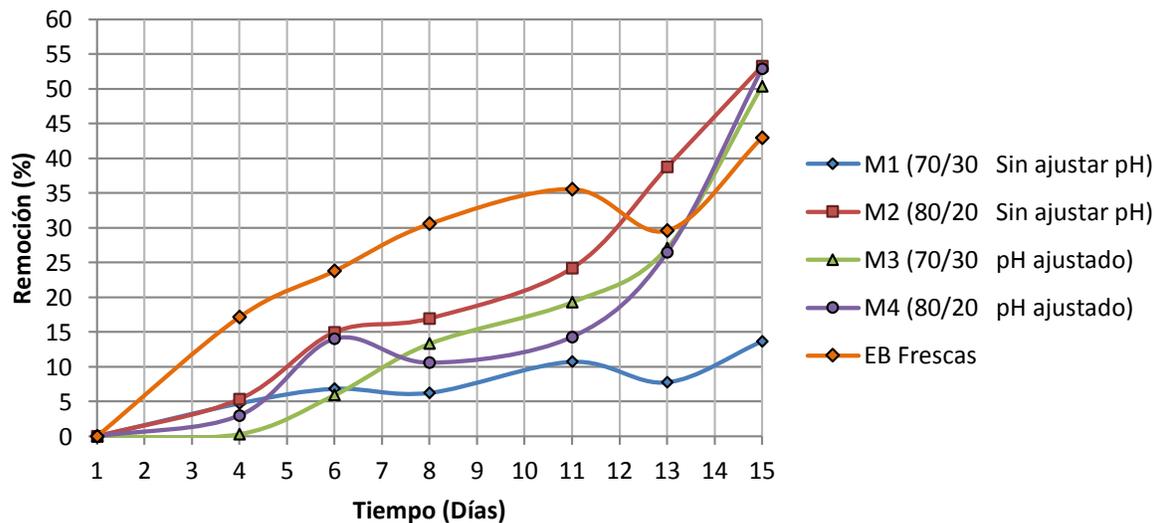


Figura 3.9. Comparación del porcentaje de degradación de la DQO Total

Como se observa en la Figura 3.9, la mezcla M1 no presentó un remoción como las demás, pues sólo removi6 el 13.68 % de la DQO Total inicial, esta mezcla no fue ajustada a un pH neutro y su codigesti6n no fue favorable. La mezcla M2 logr6 remover el 53.28 % de su DQO Total inicial, a pesar de no haber sido ajustada a un pH neutro esta mezcla logr6 reincorporarse y no present6 inhibici6n como en la M1. En las mezclas M3 y M4 el ajuste de pH favoreci6 su codigesti6n y ambas obtuvieron una remoci6n similar a la M2.

De acuerdo a la curva de degradaci6n de las excretas bovinas, la codigesti6n ajustada a un pH neutro favorece la degradaci6n de materia org6nica, 6sto se puede corroborar mediante los resultados presentados en la Tabla 3.6 en donde se hace nuevamente la comparaci6n de las mezclas en cuanto a su remoci6n de materia org6nica.

Tabla 3.6. Comparaci6n de la remoci6n de materia org6nica

Mezcla	DQO Total inicial (g/L)	DQO Total Final (g/L)	DQO Total Removida (g/L)	DQO REAL Removida	DQO Total Removida (%)
M1 (70/30) Sin ajustar	13.34	11.51	1.828	0.914	13.68
M2 (80/20) Sin ajustar	13.18	6.16	7.024	3.512	53.28
M3 (70/30) pH Ajustado	12.39	6.15	6.24	3.12	50.37
M4 (80/20) pH ajustado	13.23	6.28	6.95	3.4734	52.87
EB	7.55	4.53	3.007	1.50355	39.87

En la tabla anterior se observa una considerable diferencia de DQO inicial entre las excretas frescas y las dem6s mezclas, y aun as6 las mezclas M2, M3 y M4 lograron superar la remoci6n de las excretas bovinas sobrepasando el 50 % mientras que las excretas por s6 solas lograron remover el 39.87 % de la DQO Total.

Este hecho fundamenta el concepto de codigestión el cual establece que las propiedades de dos o más sustratos presentan un efecto sinérgico y las propiedades de cada componente se complementan entre sí. (Brinkman, 2008; Álvarez y Lien, 2009).

La mezcla que logró remover el 53.28 % fue la número 2, es decir que el 80 % de las excretas bovinas amortiguaron el pH ácido de los RSC y éstos contribuyeron a enriquecer los componentes de la mezcla lograron un efecto sinérgico. La mezcla que no consiguió reestablecerse fue la M1 sin embargo a pesar de su inhibición, la acidificación del medio permitió que se removiera el 13.68 % de la DQO Total.

Comparando la mezcla inhibida M1 y M3 se observa que el pH es un factor importante que no se debe descuidar durante la codigestión, pues de haberse ajustado el pH de la M1 ésta pudo haber presentado un porcentaje mínimo de remoción del 50 %.

Siguiendo con las comparaciones entre las mezclas de codigestión y las excretas frescas, en la Figura 3.10 se observa la medición constante de la generación de biogás en cada mezcla durante el periodo de evaluación.

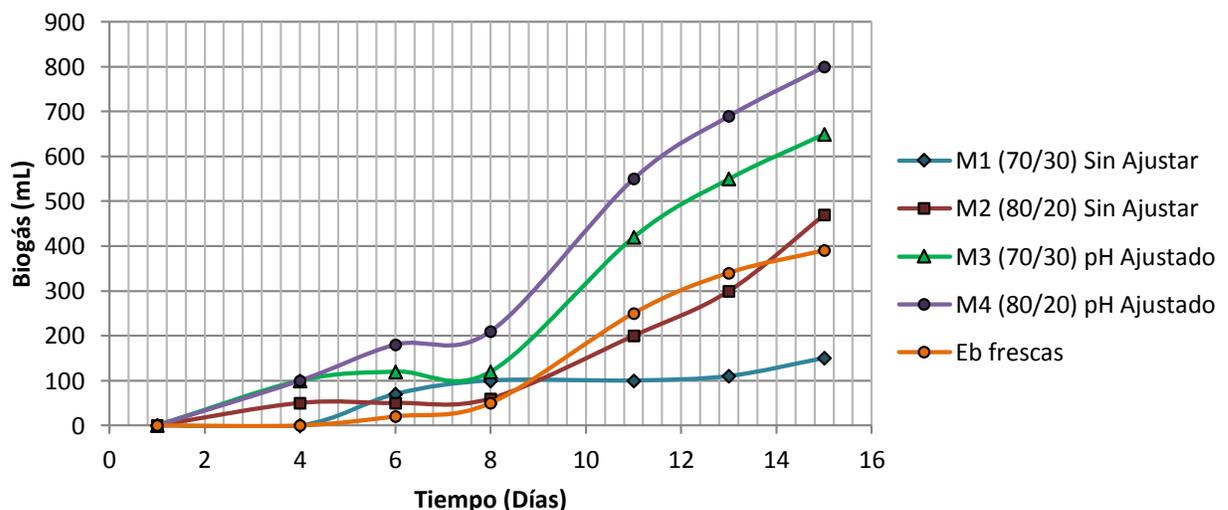


Figura 3.10. Producción de biogás

La producción de biogás graficada en la figura anterior conduce nuevamente a lo antes mencionado, que la codigestión modifica de manera positiva la mezcla y en este caso además de la degradación, la generación de biogás aumenta considerablemente en las mezclas M2, M3 y M4 a diferencia de las excretas bovinas frescas que produjeron 390 mL de biogás.

La mezcla que presentó la mayor producción de biogás fue la M4 seguida de la M3, la mezcla M2 que logró amortiguar su pH presentó la remoción de materia orgánica más alta sin embargo en cuanto a la producción de biogás ésta fue la más baja después de la M1 aunque se debe recordar que ésta última sólo produjo 150 mL debido a su inhibición.

En la Tabla 3.7 se muestran de los rendimientos de metano de cada mezcla y el porcentaje de remoción de los STV de esta etapa en comparación con las excretas bovinas frescas evaluadas en la etapa 1

Tabla 3.7. Rendimiento de metano y remoción de STV

Mezcla	Biogás producido (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (L)	y (LCH <sub>4</sub> /gDQOrem)	STV Removidos (%)
M1 (70/30) Sin ajustar	0.15	15.866	0.024	0.026	10.95
M2 (80/20) Sin ajustar	0.47	38.098	0.179	0.051	29.83
M3 (70/30) pH ajustado	0.65	40.225	0.261	0.084	44.68
M4 (80/20) pH ajustado	0.8	53.000	0.424	0.122	45.94
EB Frescas	0.39	55.132	0.215	0.143	21.47

A diferencia de las altas remociones de materia orgánica y las elevadas producciones de biogás que presentaron las mezclas en comparación con las excretas frescas, éstas no superaron el rendimiento de metano que se obtuvo con las excretas bovinas en la etapa 1, la única mezcla que logró acercarse al valor más alto de rendimiento de metano fue la mezcla M4 que sólo obtuvo un 53% de CH<sub>4</sub> y por lo tanto su rendimiento fue de 0.122 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>T</sub> removidos.

La mezcla M2 que amortiguó su pH superó a las excretas bovinas en cuanto a producción de biogás, sin embargo su composición de metano fue escasa (38 %) a diferencia del 55 % de metano producido de las excretas bovinas.

Como se observa en la tabla anterior, la mezcla M1 fue la que presentó una baja remoción de STV en comparación con las demás mezclas. Las excretas presentaron una remoción relativamente baja en comparación con la mezcla M2 que removió cerca del 30 %, sin embargo las mezclas 3 y 4 superaron el 38 % de remoción en STV para obtener un biosólido clase A de acuerdo a la NOM 004 de la SEMARNAT (2002).

### **3.6. Alimentación con RSC y monitoreo del digestor en modo batch**

Al finalizar la etapa de estabilización con el lote 3, se procedió a alimentar el digestor con los Residuos Sólidos Cítricos (RSC) recolectados anteriormente de diversos locales dedicados a la venta de jugos de naranja establecidos cerca del instituto, sin embargo debido a sus características inhibitorias (pH ácido) y a que las bacterias dentro del reactor no estaban aclimatadas a éste tipo de residuos, se decidió que el lote 4 fuera alimentado con 90% de Excretas Bovinas (EB) frescas y 10% de RSC.

Debido a su alto contenido de humedad, los RSC sólo requirieron 3 L de agua para su correcta homogenización y trituración con una licuadora convencional, se obtuvieron 22 L y posteriormente se dejaron reposar durante 48 h para que los aceites esenciales presentes se colocaran en la superficie y después pudieran ser retirados.

En el lote 4, los RSC presentaron 73.56 g/L de ST y fueron alimentados al digestor con 198 L de EB, las cuales presentaron 8.72 g/L, es decir una relación (90/10) de acuerdo a la capacidad del digestor. En los lotes posteriores se realizó el mismo procedimiento de recolección y trituración de los RSC, para el lote 5 fueron necesarios 44 L de RSC, éstos presentaron 72.18 g/L, más 176 L de EB que

presentaron 6.79 g/L, para una relación 80/20 dentro del digestor. En el lote 6 la relación fue elevada a un 70/30, es decir que se utilizaron 66 L de RSC con 74.26 g/L más 154 L de EB con 6.34 g/L.

El pH de los RSC fue ajustado a un rango de neutralidad en los lotes 4, 5 y 6 con NaOH y al igual que en la fase de arranque y estabilización, el digestor fue monitoreado diariamente. En la Figura 3.11 se observa la medición del pH que se realizó de manera diaria a los 3 lotes de alimentación con RSC.

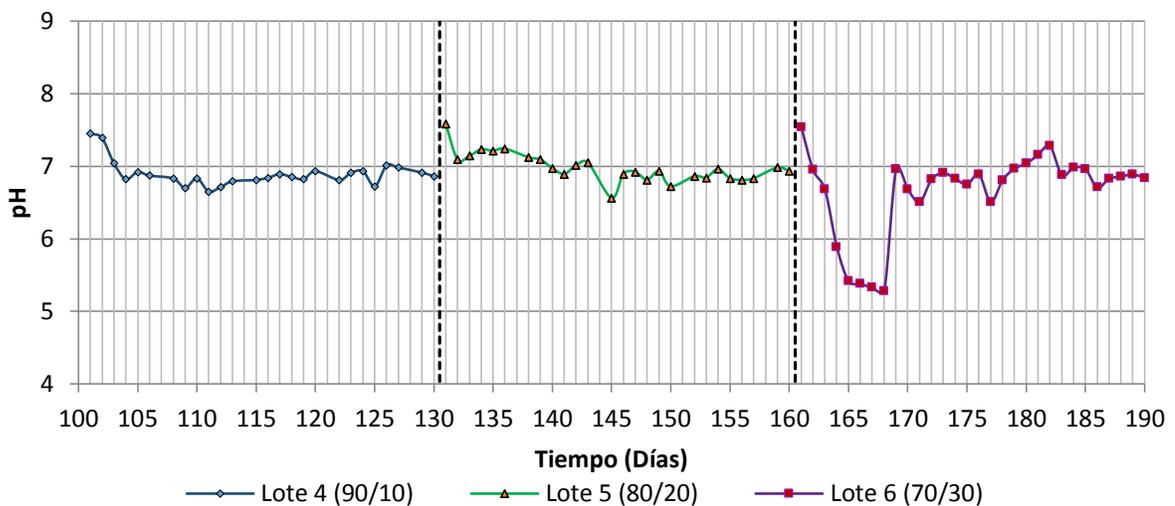


Figura 3.11. Comportamiento del pH de los RSC más las EB

En los tres lotes de alimentación, los RSC se ajustaron a un pH en promedio de 7.5, el cual disminuyó ligeramente a medida que transcurrieron los días, sin embargo se mantuvieron dentro del rango neutro, excepto los primeros días del lote 6 en los que el pH disminuyó abruptamente, por lo que fue necesaria una adición extra de NaOH al digestor y se logró ajustar nuevamente su pH, en los días posteriores, el pH osciló y se mantuvo dentro del rango de neutralidad. A pesar de haber sufrido un cambio de pH muy significativo las bacterias lograron restablecerse y no se inhibió el proceso de digestión.

En la Figura 3.12 se muestra el comportamiento de la  $DQO_T$  y la  $DQO_S$  determinada durante los tres lotes.

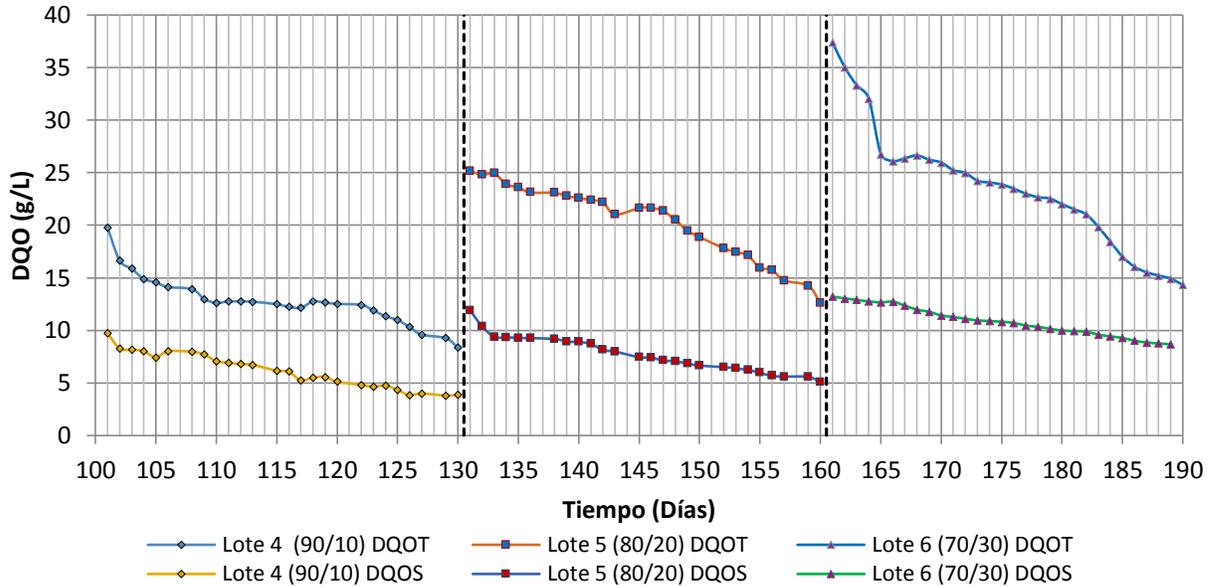


Figura 3.12. Comportamiento de la  $DQO_T$  y  $DQO_S$  de los RSC más las EB

Como se muestra en la Figura 3.12, la  $DQO$  aumentó considerablemente en comparación con las excretas bovinas en la etapa de arranque y estabilización, llegando a una  $DQO_T$  de 19.78 g/L en el lote 4 (90/10), 25.18 g/L en el lote 5 (80/20) y 37.34 g/L en el lote 6 (70/30), a pesar de la elevada  $DQO_T$ , las bacterias presentes en el digestor fueron capaces de adaptarse y degradar éste tipo de residuo y a medida que pasó el tiempo, el digestor logró remover hasta 22.45 g de la  $DQO_T$  en el lote 6.

En la Figura 3.13 se muestra la medición diaria de los ST y los STV contenidos dentro del digestor anaerobio.

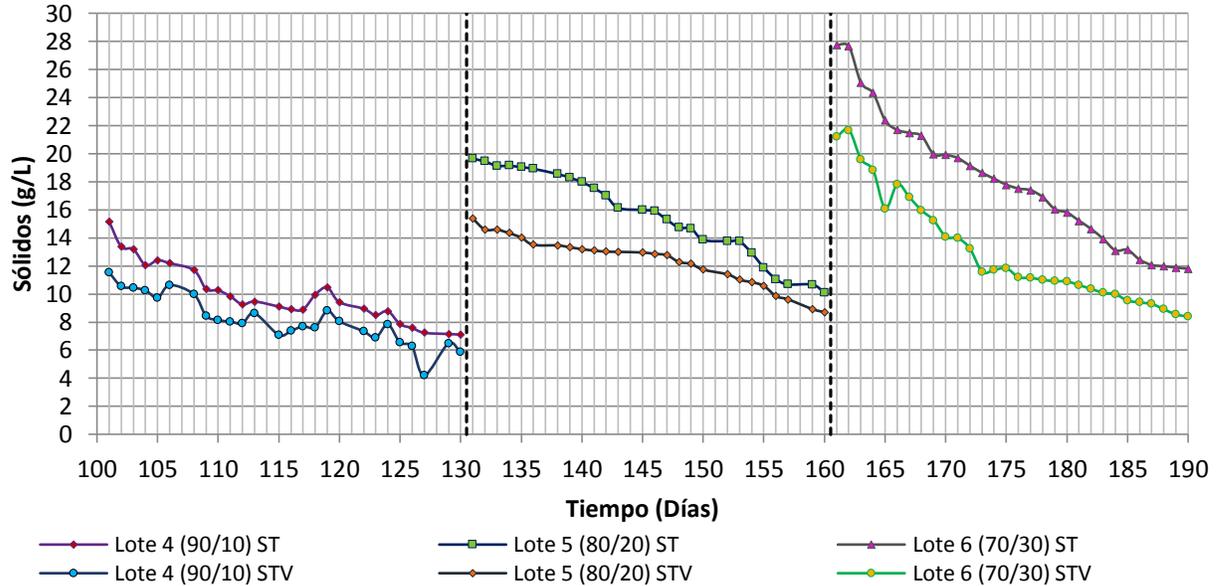


Figura 3.13. Comportamiento de los ST y los STV de los RSC más las EB.

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 3.13, la adición de RSC produjo una elevación en los sólidos al igual que en la DQO, en la alimentación del lote 4 (90/10) los ST fueron de 15.17 g/L, en el lote 5 (80/20) los ST fueron de 19.66 g/L y en el lote 6 (70/30), los ST fueron de 27.75 g/L.

A pesar de elevar el contenido de sólidos de manera inmediata en el lote 4, las bacterias se adaptaron y comenzaron la degradación de los sólidos de manera constante. En el lote 5 el comportamiento de los sólidos es similar al lote 4 ya que su degradación no rebasa el 50 % de STV, a diferencia del lote 6, en donde la remoción de los STV fue del 60 %.

En la Figura 3.14 se muestra la medición constante de la producción de biogás en cada uno de los lotes 4, 5 y 6 alimentados con RSC.

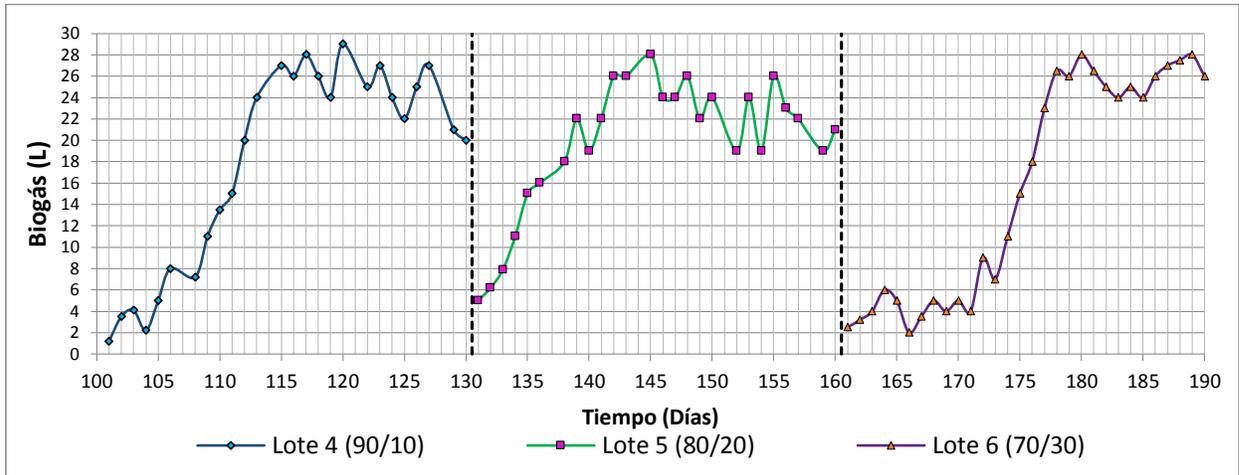


Figura 3.14. Producción diaria de biogás en los lotes 4, 5 y 6

En el lote 4 el contenido del reactor comenzó a adaptarse y después del día 8 de operación la producción de biogás empezó a incrementarse exponencialmente hasta alcanzar los 29 L. En el lote 5 las producción comenzó a incrementar de forma similar al lote anterior. En el lote 6 la producción de biogás se vio afectada al principio, sin embargo comenzó a incrementar en el día 14 del lote.

En la Figura 3.15 se observa el porcentaje de metano determinado mediante cromatografía de gases en los 3 lotes alimentados con EB y RSC.

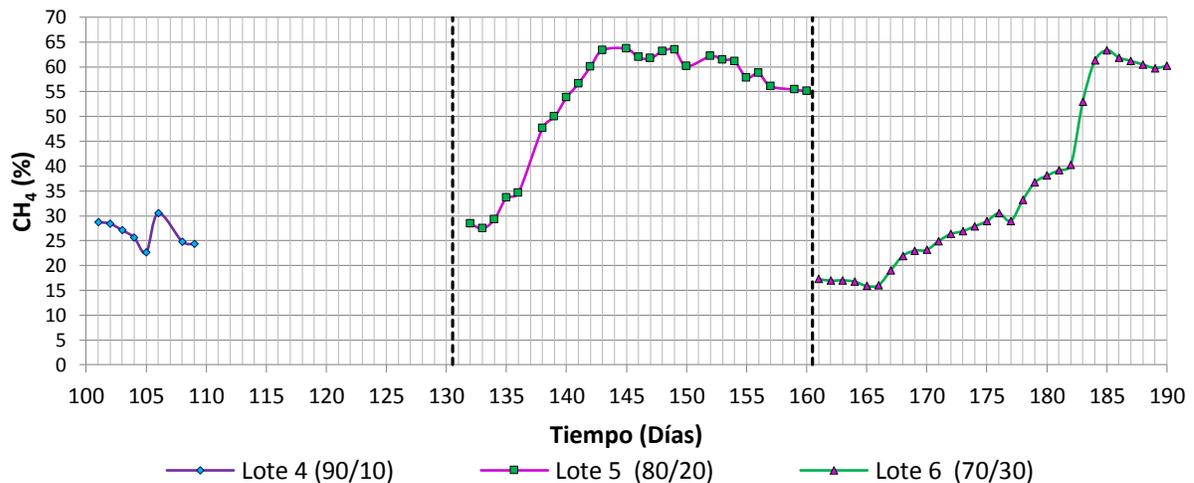


Figura 3.15. Porcentaje de metano en los lotes 4, 5 y 6.

Al inicio del lote 4, la composición de metano osciló entre el 22.5 % y 30.5 %, en los días posteriores no fue posible determinar la composición del biogás. En el lote 5 se observa un incremento de metano en los primeros días, hasta obtener alrededor de un 63 %, en el lote 6 el porcentaje de metano comenzó a incrementar hasta el día 18. En la Tabla 3.8 se muestran los litros de biogás acumulados y los rendimientos de metano mínimos y máximos alcanzados en cada lote.

Tabla 3.8. Producción de biogás y rendimientos de metano en los lotes 4, 5 y 6

Lote	Operación (Días)	Biogás acumulado (L)	y mínimo $LCH_4/gDQO_{Trem}$	y máximo $LCH_4/gDQO_{Trem}$
4. (90/10)	30	549.8	0.00144	0.09544
5. (80/20)	30	601.1	0.01409	0.33758
6. (70/30)	30	466.7	0.00068	0.33107

Como se puede observar en la tabla anterior, el lote de composición 80/20 fue el que produjo la mayor cantidad de biogás durante toda su operación. En la Figura 3.17 se muestra que el porcentaje de metano fue variable todos los días en cada lote y por lo tanto el rendimiento también lo fue, es por eso que en la Tabla 3.8 sólo se muestran los rendimientos mínimos y máximos obtenidos. Los rendimientos mínimos de metano por lo regular se presentaron al principio de cada lote y los rendimientos máximos se alcanzaron alrededor de los últimos 10 días de cada lote.

En comparación con los resultados obtenidos en las fases de arranque y estabilización mostrados en la Tabla 3.3, los lotes alimentados con EB y RSC mostraron rendimientos mínimos muy bajos, sin embargo en el lote 4 y 5 los rendimientos máximos lograron alcanzar a los resultados de los lotes 1 y 3, es decir que a partir del lote 6 el digestor anaerobio comenzó a estabilizarse.

### 6.1. Determinación de la Carga Volumétrica Aplicada (CVA)

Al término de la codigestión en lotes de 30 días, era necesario verificar el desempeño de las bacterias y evaluar la codigestión de los residuos con un menor tiempo de operación, así que se prosiguió a alimentar con la misma relación de 80/20 pero en esta ocasión con un tiempo mucho más corto. En la Tabla 3.9 se observan los parámetros de evaluación en el digestor durante esta etapa.

Tabla 3.9. Composición de materia orgánica en cada lote

Lote	Operación (Días)	Alimentación (L)	DQO Inicial (g/L)	DQO Final (g/L)	DQO Removida (%)
1	5	44	13.58	9.57	29.51
2	10	44	12.17	6.39	47.49
3	10	44	14.25	8.53	40.07
4	10	44	17.86	15.78	11.64

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa que al inicio con el lote de 5 días la remoción de  $DQO_T$  fue menor del 30 %, es decir que la materia orgánica era de difícil degradación por lo que se decidió aumentar el tiempo de residencia en los lotes posteriores. A partir del lote 2 la operación fue de 10 días y se pudo notar la diferencia en la degradación ya que aumentó el porcentaje de remoción a un 47.49%.

El lote 3 mantuvo un comportamiento similar al lote anterior obteniendo una remoción del 40.07%, sin embargo al aumentar la  $DQO_T$  inicial en el lote 4 la biodegradabilidad disminuyó drásticamente a un 11.64%.

En la Figura 3.16 se muestra la producción diaria de biogás en cada lote.

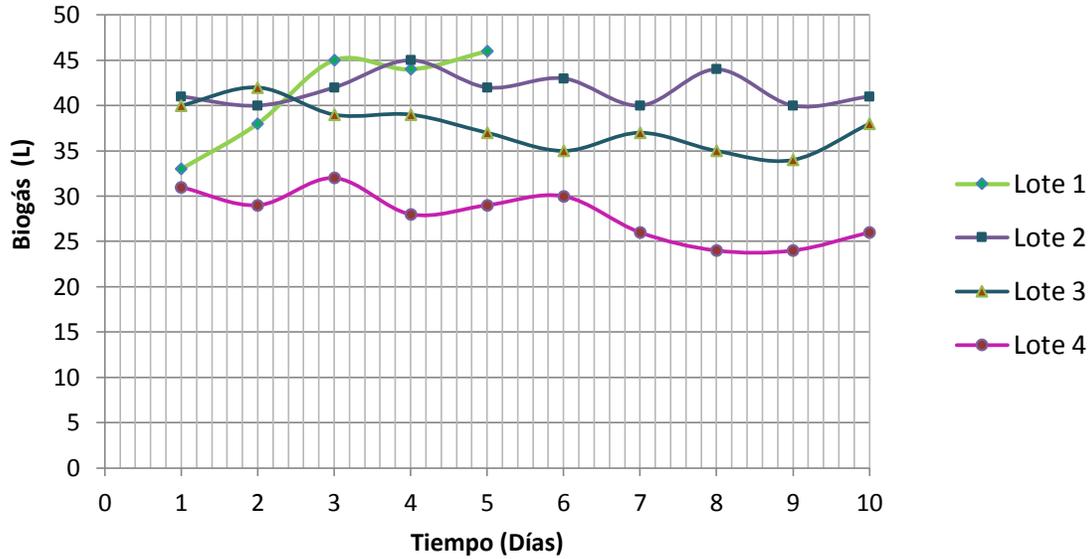


Figura 3.16. Producción diaria de biogás en cada lote

En la Figura 3.16 se aprecia que la producción de biogás más alta fue la del lote 2 aunque en el lote de 5 días seguía la misma tendencia. En la Tabla 3.10 se reúnen los rendimientos de metano en cada lote.

Tabla 3.10. Rendimiento de metano máximo alcanzado en cada lote

Lote	y máximo alcanzado (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>Trem</sub> )
1	0.103
2	0.164
3	0.117
4	0.134

El lote 2 obtuvo el rendimiento de metano más alto alcanzando un valor de 0.164 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>T</sub>rem y aun cuando el lote 4 no removió la misma cantidad de materia orgánica que en los lotes anteriores su rendimiento fue mayor que el lote de 5 días.

Con los datos obtenidos durante esta etapa de evaluación se determinó que el lote 2 obtuvo los mejores resultados en cuando a degradación y rendimiento de metano debido a que su DQO<sub>T</sub> inicial fue menor que la de los demás, así que se optó por una Carga Volumétrica Aplicada (CVA) de 8 gDQO/L\*d para verificar si la disminución de materia orgánica mejoraba el desempeño del digestor.

## **6.2. Cambio de operación del digestor anaerobio a modo semicontínuo**

En la etapa anterior se observó que la degradación de materia orgánica iba en decremento cada vez más y se debió a que al inicio de cada lote se retiraba el 20 % de la mezcla interior, llegando a retirar hasta el 80 % al final de la evaluación, así que con el objetivo de mantener la mayor cantidad de bacterias adaptadas dentro del digestor y que estas no fueran disminuyendo constantemente durante este nuevo periodo de evaluación se modificó la forma de alimentación.

### **6.2.1. Adaptación de la alimentación**

Considerando que el volumen útil del digestor anaerobio es de 220 L y que la CVA requerida fue de 8 gDQO<sub>T</sub>/L\*d se calculó que eran necesarios 1760 g de DQO<sub>T</sub> para cubrir la CVA. Al inicio de esta nueva evaluación la DQO<sub>T</sub> en el interior del digestor era de 4.96 g/L, considerando el volumen útil, la DQO<sub>T</sub> real fue de 1091 g es decir que para cubrir la CVA era necesario adicionar 668.8 g.

Se prepararon RSC nuevamente para la alimentación y esta vez su DQO<sub>T</sub> fue de 58.82 g/L. La relación de los 668.8 g que faltaban para cubrir la CVA entre la DQO<sub>T</sub> de los RSC dio como resultado la cantidad en litros de RSC que se usaron para la alimentación.

Cada 24 h antes de alimentar el digestor se determinaba la cantidad de  $DQO_T$  en su interior y con base a ese resultado se hacia el cálculo nuevamente para determinar la cantidad de RSC a utilizar en la alimentación y una cantidad igual se retiraba del interior para mantener los 220 L.

La operación semicontinua fue de 10 días, a continuación en la Tabla 3.11 se muestran los resultados del monitoreo diario del digestor.

Tabla 3.11. Composición y remoción diaria del digestor

Día	RSC alimentados (L)	$DQO_T$ (g/L) Entrada	$DQO_T$ Removida (g/L)	$DQO_T$ Real removida	Remoción de $DQO_T$ (%)
1	11.4	8.15	2.96	651.2	36.319
2	10.5	8.04	1.93	424.6	24.005
3	7.07	8.09	1.77	389.4	21.879
4	6.28	7.96	1.59	349.8	19.975
5	6.1	8.13	2.11	464.2	25.953
6	7.41	8.27	2.4	528	29.021
7	7.97	8.11	2.35	517	28.977
8	8.38	7.92	2.48	545.6	31.313
9	9.57	7.89	3.02	664.4	38.276
10	11.7	7.74	2.51	552.2	32.429

En la Tabla 3.11 es evidente que la remoción de materia orgánica nuevamente se reestableció después de haber disminuido a un 11.64 % en el último lote de 10 días en la fase anterior. La alimentación del digestor tuvo un promedio de 8.03 g/L por día de  $DQO_T$  y eso contribuyó al aumento de la remoción llegando a 38.27% en el día 9.

En la Figura 3.17 se muestra gráficamente el comportamiento del digestor y la degradación diaria que éste mantuvo durante este periodo.

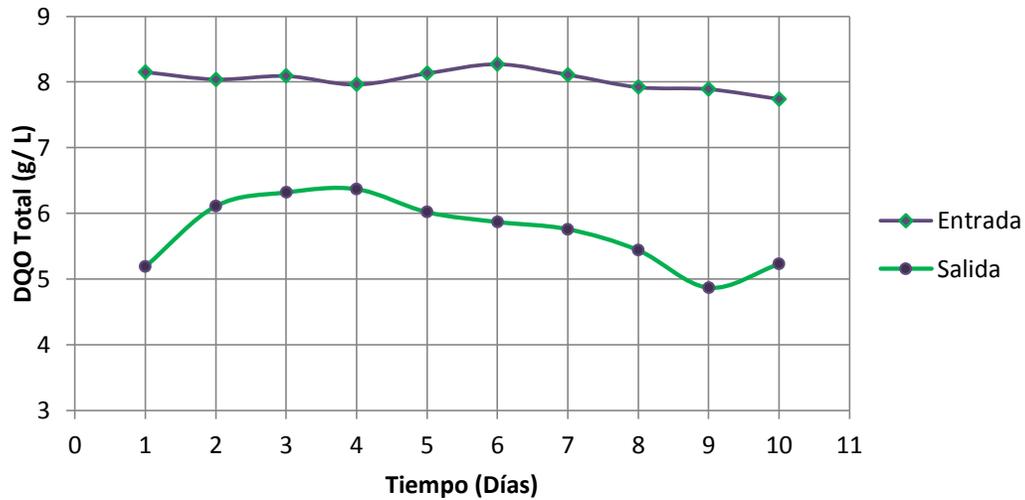


Figura 3.17. Comportamiento de la DQOT en el reactor

En la figura anterior se observa que la remoción de la  $DQO_T$  fue en promedio de 5.72 g/L y ésta se mantuvo constante a lo largo de los 10 días de operación, excepto en el día 9 en donde se observa una disminución hasta 4.87 g/L

A continuación en la Tabla 3.12 se muestra la cantidad de biogás producido, su composición y el rendimiento de metano de cada día.

Tabla 3.12. Generación de biogás y rendimiento de metano.

Día	Biogás producido (L)	CH4 (%)	CH4 (L)	y ( $LCH_4/gDQO_Trem$ )
1	22	32.87	7.231	0.011
2	18	35.49	6.388	0.015
3	19	43.62	8.288	0.021
4	22	42.55	9.361	0.027
5	21	46.49	9.763	0.021
6	23	42.91	9.869	0.019
7	24	49.78	11.947	0.023
8	22	46.62	10.256	0.019
9	24	49.73	11.935	0.018
10	21	43.74	9.185	0.017

Se mantuvo una generación de biogás de 21.6 L diarios en promedio con una composición máxima de metano del 49.78% en día 7 a diferencia de los lotes anteriores en donde el promedio de biogás diario fue de 41.2 L, esto contribuyó a que el rendimiento de metano no lograra recuperarse.

### 6.2.2. Alimentación en modo semicontínuo

En la fase anterior de adaptación se observó que la degradación de materia orgánica se restablecía día con día, manteniendo un promedio de 8.63 L de RSC alimentados diariamente, es decir que durante los 10 días se reemplazó menos del 40% del volumen útil. Después de un periodo de 7 días sin alimentar el digestor se estableció una nueva forma de alimentación en semicontínuo.

La CVA se fijó nuevamente en 8 gDQOT/L\*d, considerando que la mezcla interior fue de 198 L (90/10) y que su DQO<sub>T</sub> fue de 4.22 g/L al inicio, se calculó que dentro del digestor había 835.56 g de DQO<sub>T</sub> por lo que aún faltaban 924.44 g para cubrir los 1760 g que se necesitaban.

Ésta vez el porcentaje de RSC fue aumentado a un 10 % en la alimentación, es decir que el volumen de alimentación sería de 22 L y la relación de los 924.44 g faltantes entre los litros de alimentación dio como resultado que cada litro de RSC debía tener una composición de 42.02 g, por lo que fue necesario diluir los RSC hasta llegar a la carga deseada ya que éstos presentaron una DQO<sub>T</sub> de 49.86 g/L

Para el cálculo de la DQO<sub>T</sub> requerida en los RSC, se utilizó la Ecuación 2.2 y se obtuvo que eran necesarios 18.54 L de RSC diluidos con 3.46 L de agua destilada para obtener una DQO<sub>T</sub> de 42.02 g/L a partir de una DQO<sub>T</sub> de 49.86 g/L. De esta manera, cada 24 h que se alimentaba el digestor se realizaba el mismo procedimiento para calcular los litros necesarios de RSC y agua destilada.

### 6.3. Estabilización y monitoreo del digestor anaerobio en modo semicontínuo

La operación se llevó a cabo nuevamente por 10 días, en la Tabla 3.13 se muestra la cantidad de litros de RSC usados para alimentar el reactor y los litros de agua necesarios para diluirlos cada día, la cantidad de materia orgánica por la que estaba compuesta la alimentación y las remociones alcanzadas.

Tabla 3.13. Composición y remoción diaria del digestor en modo semicontínuo

Día	RSC (L)	Agua de dilución (L)	DQO <sub>T</sub> de entrada (g/L)	DQO <sub>T</sub> de salida (g/L)	DQO <sub>T</sub> Removida (%)
1	18.54	3.46	8.42	6.18	26.60
2	10.76	11.24	8.23	6.43	21.87
3	9.76	12.24	7.84	6.07	22.58
4	11.19	10.81	8.74	6.41	26.66
5	9.84	12.16	8.59	6.38	25.73
6	9.96	12.04	8.18	6.09	25.55
7	11.11	10.89	8.51	6.54	23.15
8	9.33	12.67	8.43	6.46	23.37
9	9.65	12.35	8.22	6.62	19.46
10	9.01	12.99	8.37	6.24	25.45

En la tabla anterior se observa que la alimentación de los RSC fue en promedio de 10.91 L/d con una media en su composición de 8.35 g/L de DQO<sub>T</sub>/d. La degradación de materia orgánica se mantuvo constante y cada día al caracterizar la salida, se observaba una disminución en la DQO<sub>T</sub> de aproximadamente 2.01 g, de esta manera el reactor presentó en promedio una remoción del 24.04 %, llegando al término de la operación con un 25.45 % de degradación.

Como se puede apreciar, esta vez los valores de remoción disminuyeron nuevamente en comparación con el lote anterior, sin embargo se debe tomar en cuenta que en esta ocasión se retiraron 22 L de la mezcla de manera constante durante 10 días, es decir que al término del periodo de operación se había retirado el equivalente al 100% del volumen útil del digestor y aun así las bacterias lograron remover la materia orgánica. En la Figura 3.18 se muestra gráficamente el comportamiento de la DQO de entrada y salida en el digestor.

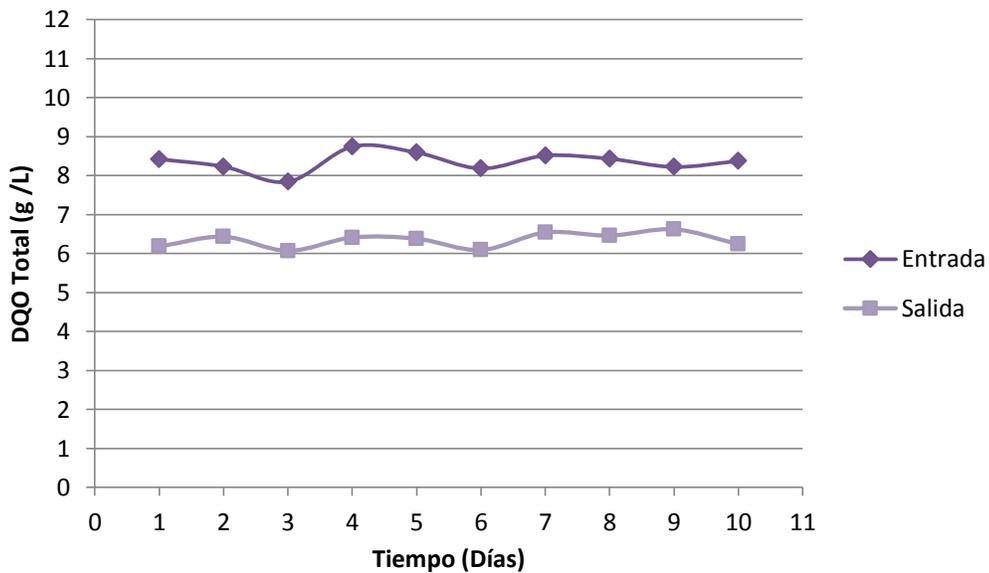


Figura 3.18. Comportamiento de la DQO<sub>T</sub> en digestor

En la Figura 3.18 se puede observar la diferencia entre los gramos de DQO<sub>T</sub> en la alimentación y los presentes después de las 24 h, corroborando lo antes mencionado.

En la Tabla 3.14 se presenta la producción diaria de biogás y la composición de este, así como los litros de metano.

Tabla 3.14. Producción de metano diaria y su composición

Día	Biogás L	% CH <sub>4</sub>	L CH <sub>4</sub>	y (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>Trem</sub> )
1	23	33.89	7.79	0.0158
2	22	35.41	7.79	0.0197
3	24	32.46	7.79	0.0200
4	25	31.42	7.86	0.0153
5	27	35.48	9.58	0.0197
6	26	36.49	9.49	0.0206
7	23	35.45	8.15	0.0188
8	28	34.76	9.73	0.0225
9	22	33.78	7.43	0.0211
10	24	32.45	7.79	0.0166

La generación diaria de biogás en promedio del digestor fue de 24.4 L, es decir que superó ligeramente la producción del lote anterior (21.6 L) sin embargo, la composición de metano disminuyó aproximadamente un 10 % en comparación con el lote anterior, por lo que el rendimiento de metano se mantuvo bajo nuevamente.

Los datos reunidos anteriormente se pueden considerar bajos comparando este lote de 10 días con los lotes de 30 días que se llevaron a cabo durante 6 meses, sin embargo después de modificar la alimentación del digestor y retirar cada día el 10 % de la mezcla interior sólo era necesario permitir que las bacterias se adaptaran por más tiempo dentro del digestor, por lo que es necesario modificar la alimentación en semicontínuo, disminuyendo el porcentaje de RSC.

#### 6.4. Evaluación y análisis del acondicionamiento del sustrato a escala laboratorio

Después de las diferentes formas de operación (batch y semicontínuo), el digestor se mantuvo en constante agitación y sin alimentar durante 30 días. Posteriormente se retiraron 3 L del contenido del reactor y se evaluó el acondicionamiento de este sustrato para digerir los RSC. Se adaptaron 8 diferentes mezclas en matraces de 500 mL y ajustando su pH con NaOH se monitorearon durante 15 días. En la Tabla 3.15 se muestran las cantidades utilizadas del sustrato que se retiró del reactor (inóculo) y los RSC que se les adicionaron.

Tabla 3.15. Proporciones de las mezclas evaluadas.

Mezcla	%		mL	
	(Inóculo/RSC)		Inóculo	RSC
1	50/50		400	100
2	60/40		350	150
3	70/30		300	200
4	80/20		250	250
Total			1300	700

En la tabla anterior se muestra el total de las cantidades usadas de inóculo y RSC, sin embargo 4 matraces fueron utilizados para muestrear cada 2 días y así determinar sus parámetros fisicoquímicos y otros 4 con las mismas proporciones fueron utilizados sólo para evaluar su producción de biogás, de esta manera el total de inóculo utilizado fue de 2.6 L y la cantidad de RSC fue de 1.4 L.

Los residuos sólidos cítricos usados en la evaluación fueron preparados de la misma manera que se describe en el punto 2.6 de este trabajo. En la Figura 3.19 se muestra el comportamiento del pH de las 4 mezclas.

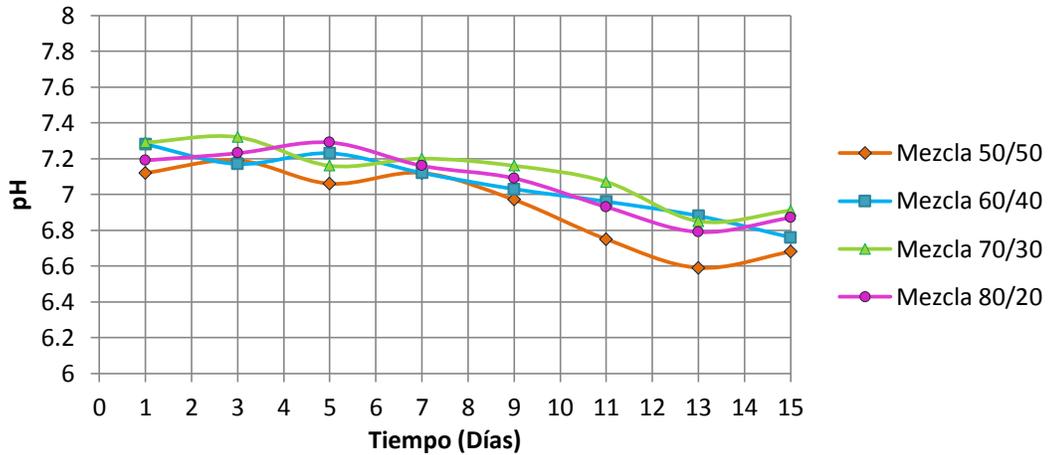


Figura 3.19. Monitoreo del pH durante la evaluación

Como se observa en la figura anterior a medida que transcurren los días el pH muestra un descenso muy pequeño en las 4 mezclas, sin embargo a pesar de que este sólo fue ajustado al inicio del proceso de digestión, las mezclas lograron permanecer dentro de los límites de pH adecuados para la digestión anaerobia (Kaparaju, 2006; Purser *et al.*, 2014).

En la Figura 3.20 se muestra la constante degradación de la materia orgánica, la cual fue monitoreada por medio de la determinación de la DQO<sub>T</sub>.

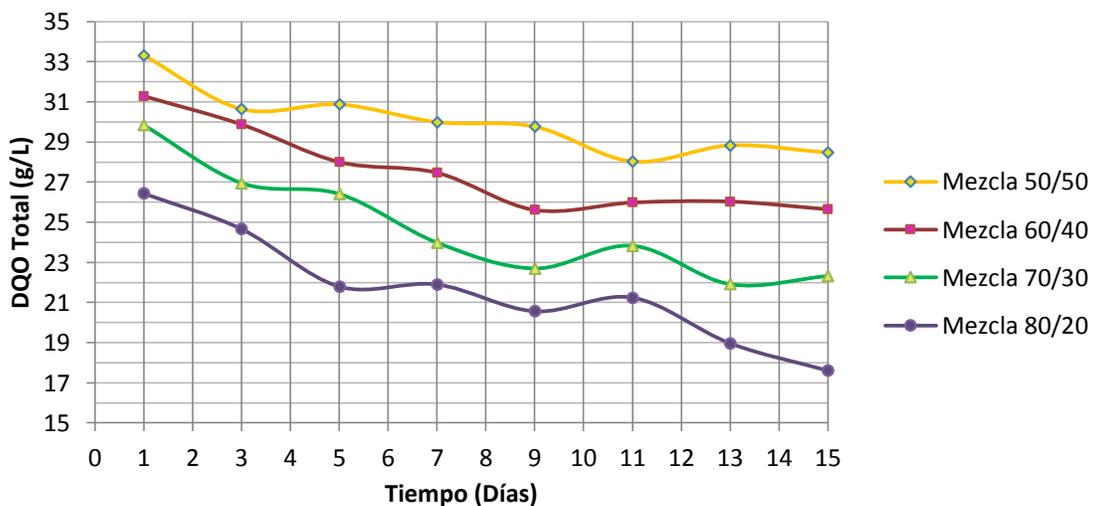


Figura 3.20. Comportamiento de la DQO<sub>T</sub> durante la digestión en los matraces

En la figura anterior se observa que la degradación de materia orgánica fue constante en cada mezcla y que ninguna de ellas sufrió inhibición a pesar de presentar una elevada DQO<sub>T</sub>. En la Tabla 3.16 se muestran los resultados de las remociones alcanzadas en cada una de las mezclas.

Tabla 3.16. Remoción de materia orgánica en las mezclas evaluadas

Mezcla	DQO Total inicial (g/L)	DQO Total Final (g/L)	DQO Total Removida (g/L)	DQO REAL Removida	DQO Total Removida (%)
50/50	33.3225	28.474	4.8485	2.42425	14.55
60/40	31.2875	25.6475	5.64	2.82	18.03
70/30	29.8425	22.3222	7.5203	3.76015	25.20
80/20	26.435	17.604	8.831	4.4155	33.41

Como se puede observar en la tabla anterior, la mezcla que presentó la DQO<sub>T</sub> más alta fue la de proporción 50/50, al ajustar su pH desde el principio permitió que lograra degradar un 14.55 %. La mezcla que logró remover más del 33% de la materia orgánica fue la de proporción 80/20.

En la Figura 3.21 se muestra la degradación continua de los sólidos totales contenidos en cada mezcla.

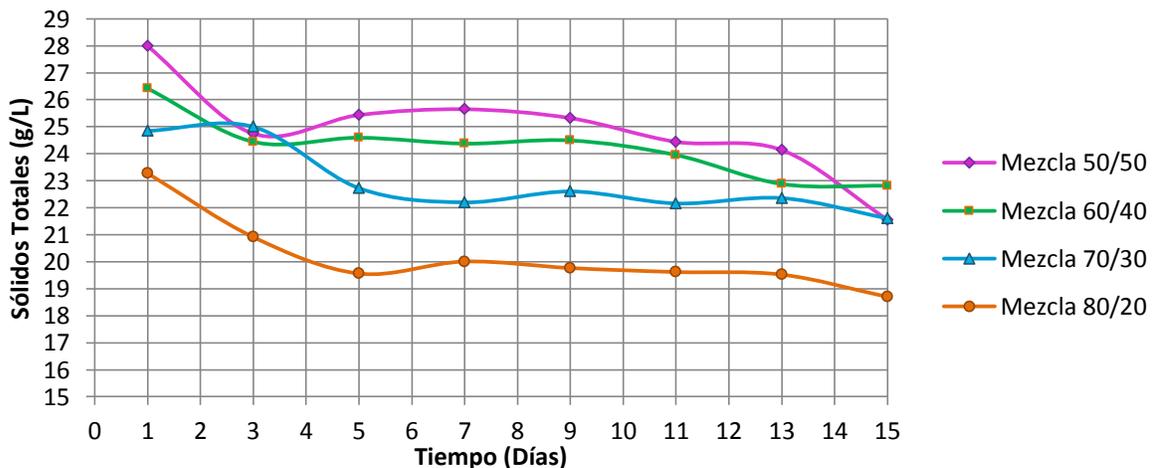


Figura 3.21. Comportamiento de los sólidos totales en cada mezcla

Como se observa en la figura anterior, la remoción de Sólidos Totales (ST) se comportó de manera similar que la DQO<sub>T</sub> y la mezcla que contuvo menos sólidos fue la de 80/20, al contrario de la mezcla 50/50 que representó la cantidad de sólidos totales más alta y aun así logró degradar materia orgánica. En cuanto a los Sólidos Totales Volátiles (STV) ninguna mezcla logró llegar al 38% de remoción de éstos como lo establece la NOM 004 de la SEMARNAT (2002), todas las mezclas superaron el 26% de remoción de STV, excepto la última de 80/20 que removió el hasta el 32.69%.

En la Figura 3.22 se muestra producción de biogás de manera diaria en cada una de las mezclas evaluadas.

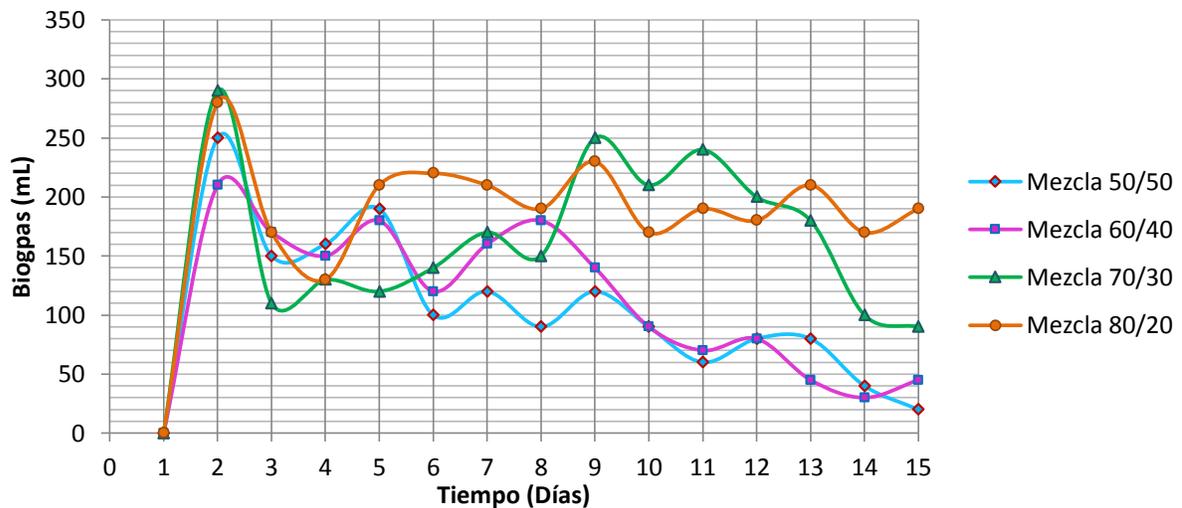


Figura 3.22. Generación diaria de biogás

Como se observa en la figura anterior, en el transcurso del primer día la generación de biogás se disparó y al llegar al segundo día todas las mezclas produjeron más de 200 mL, sin embargo en los días posteriores esta bajó considerablemente y fue hasta el quinto día que nuevamente se observó un aumento en la producción de biogás, excepto para la mezcla 50/50 que cada día disminuía su generación comportándose de manera similar a la mezcla 60/40. En la Tabla 3.17 se muestra la composición del biogás y el rendimiento obtenido en cada mezcla.

Tabla 3.17. Composición y rendimiento del biogás

Mezcla	Biogás acumulado (L)	CH <sub>4</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (L)	y (LCH <sub>4</sub> /gDQO <sub>Trem</sub> )
50/50	1.55	35.7993	0.55489	0.229
60/40	1.67	42.277	0.70603	0.250
70/30	2.38	37.4448	0.89119	0.237
80/20	2.75	38.3329	1.05415	0.239

De acuerdo con los resultados de las evaluaciones a escala laboratorio que se realizaron anteriormente y se describen en el punto 3.5.1, el rendimiento de metano alcanzado en la digestión de las Excretas Bovinas (EB) por sí solas fue de 0.143 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> con un 55 % de metano, en esa misma evaluación, la mezcla de EB+RSC obtuvo 0.164 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> a pesar de que en el día 8 esta se inhibió debido a que no se ajustó su pH, sin embargo, la carga orgánica de ambas mezclas mencionadas fue mucho más baja que las mezclas de esta etapa.

En la evaluación del efecto del pH y la concentración del inóculo en la codigestión de las EB con los RSC, descrita en el punto 3.5.2 de este trabajo se observó que la mezcla cuatro de 80/20 con el pH ajustado obtuvo un 53 % de metano y por lo tanto su rendimiento fue de 0.122 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub>, siendo esta mezcla la que alcanzó el rendimiento más alto, sin embargo a pesar de contener menos RSC que en la mezcla anterior del punto 3.5.1 y haber sido ajustada a un pH neutro, la mezcla 80/20 no superó el rendimiento de 0.164 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> que se obtuvo en la mezcla EB+RSC a pesar de que ésta tuvo sólo el 37.98 % de metano.

Los rendimientos de metano que se obtuvieron en esta última etapa han superado a los obtenidos anteriormente en los puntos 3.5.1 y 3.5.2, siendo la mezcla 60/40 la que alcanzó el valor más alto con 0.25 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> y un 42.27 % de metano, sin embargo a pesar de haber superado a la anteriores en cuanto al rendimiento, estas últimas mezclas no alcanzan el mismo porcentaje de metano ya que su contenido en sólidos es mucho más alto que las mezclas anteriormente evaluadas y esto pudo haber disminuido la concentración de metano según Ward *et al.*, (2008).

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

De acuerdo a la caracterización que se realizó de los residuos sólidos de la industria cítrica, la elevada carga orgánica y su pH ácido representan un problema de contaminación si estos no son dispuestos debidamente. De igual manera las Excretas Bovinas (EB) mostraron características que son contaminantes, sin embargo el pH que estas presentaron siempre estuvo por encima de la neutralidad, es por ello que las EB resultaron ser un complemento benéfico para la codigestión con los Residuos Sólidos Cítricos (RSC), pues las características inhibitorias de estos no fueron obstáculo para que la comunidad bacteriana de las EB se adaptara y lograra degradar la carga orgánica presente.

La operación a nivel piloto del digester anaerobio consistió en 7 etapas, como primer punto se inoculó con las excretas bovinas extraídas de un reactor de geomembrana, esto permitió que las paredes del dispositivo fueran colonizadas con bacterias dispuestas a degradar excretas bovinas diluidas, por lo tanto al momento del arranque, el digester fue alimentado con el 100 % de EB. Durante el arranque (primer lote), no se presentaron dificultades y la carga orgánica fue constantemente degradada durante 30 días, permitiendo una producción de biogás homogénea, sin embargo su composición apenas alcanzó el 56.35 % de metano, por lo que se mantuvo la alimentación con EB exclusivamente durante dos lotes más (lotes de estabilización), esto permitió que el digester anaerobio mantuviera las condiciones idóneas y se alcanzó un rendimiento de metano de 0.347 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>Trem</sub> en el lote dos con un 65.9 % de metano.

Durante la operación del digester a nivel piloto, se realizaron pruebas de biodegradabilidad a escala laboratorio con diferentes tipos de sustratos y mezclas con el motivo de verificar la viabilidad de la codigestión de los RSC con otro tipo de residuos. Como resultado de estas pruebas se obtuvo que los residuos sólidos de la industria cítrica pueden ser tratados mediante codigestión anaerobia, sin embargo

la mezcla de EB +RSC con una concentración de 50/50 presentó inhibición después de 8 días de haber iniciado su proceso de digestión debido al pH bajo de los residuos cítricos, por esta razón se realizó una segunda evaluación en donde se observó el efecto del pH y la concentración de inóculo (EB) en diferentes mezclas. Como resultado se obtuvo que la comunidad bacteriana de las excretas bovinas pudo adaptarse y digerir los RSC en una mezcla 80/20 (EB/RSC) sin ajustar el pH, sin embargo en todas las mezclas con un pH ajustado a la neutralidad presentaron remociones de materia orgánica. A nivel laboratorio se obtuvo que la codigestión de los RSC con las EB favorece al incremento de la producción de biogás, pues las excretas por sí solas produjeron 390 mL de biogás mientras que en las mezclas con un pH ajustado la generación de biogás fue de 650 mL y 800 mL en las mezclas 70/30 y 80/20 respectivamente, sin embargo ninguna de éstas mezclas supero el 55% de metano que presentaron las excretas bovinas y por lo tanto ninguna mezcla alcanzó el rendimiento de metano de  $0.143 \text{ LCH}_4/\text{gDQO}_{\text{Trem}}$  de las excretas, la única mezcla que se acercó a este resultado fue la mezcla 80/20 con pH ajustado con un  $0.122 \text{ LCH}_4/\text{gDQO}_{\text{Trem}}$ .

Después de que el digestor fuera estabilizado con las EB, se inició la adición de RSC en el lote cuatro con un 10% de éstos para que las bacterias se adaptaran al cambio de sustrato de manera paulatina ajustando el pH. Los RSC fueron recolectados y preparados con la finalidad de asemejar las características de los residuos sólidos de la industria citrícola. En este lote la producción de biogás disminuyó, sin embargo a pesar de que la carga orgánica fue elevada considerablemente al agregar los RSC éstos no inhibieron el proceso de digestión anaerobia y lograron degradar el 57.74 % de la  $\text{DQO}_{\text{T}}$ . Con el motivo de observar si una concentración mayor de RSC disminuía el porcentaje de degradación de materia orgánica se procedió a alimentar el digestor con el 20% de RSC en el lote 5 y posteriormente en el lote 6 con el 30 % de RSC.

Durante los lotes 5 y 6 la codigestión con RSC favoreció el incremento del rendimiento de metano ya que en el lote 4 apenas logró un  $0.095 \text{ LCH}_4/\text{gDQO}_{\text{Trem}}$  y en los lotes 5 y 6 se alcanzaron rendimientos del  $0.337$  y  $0.331 \text{ LCH}_4/\text{gDQO}_{\text{Trem}}$  respectivamente, por lo que se concluye que la adición progresiva de RSC a las excretas bovinas es favorable para la adaptación de las bacterias anaerobias.

Después de la operación en modo batch y al observar que la generación de biogás era constante al igual que la degradación de materia orgánica se realizó el cambio de operación a modo semicontínuo, sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos, la degradación de la  $\text{DQO}_T$  se vio afectada, disminuyendo considerablemente al igual que la producción de biogás y por lo tanto el rendimiento de metano fue muy bajo en comparación con los lotes en modo batch, por lo tanto después de esta etapa el digester se mantuvo sin alimentar durante 30 días con el objetivo de que la comunidad bacteriana se adaptara y consumiera la materia orgánica presente.

Finalmente, se realizaron otras pruebas a nivel laboratorio, después de que no se alimentó el digester por 30 días se retiraron 3 L del contenido del digester y se realizaron pruebas de biodegradabilidad con diferentes mezclas ajustando su pH. Los resultados obtenidos indicaron que el consumo de materia orgánica por la comunidad bacteriana incrementó y ésto contribuyó a que se consiguiera una mayor producción de biogás en comparación con las mezclas estudiadas en etapas anteriores, los rendimientos de metano superaron al obtenido de las EB por sí solas, ésto indica que las bacterias lograron adaptarse aun cuando estas se vieron afectadas en la alimentación semicontínua.

Tomando como base los resultados de este trabajo, los residuos sólidos cítricos presentan características que los hacen adecuados para su uso en la generación de bioenergéticos. La elevada carga orgánica de los residuos de la industria citrícola puede ser removida mediante la codigestión anaerobia con las excretas bovinas si se mantiene cuidado en los parámetros como el pH y la concentración del inóculo.

## RECOMENDACIONES

Considerando los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se recomienda que se realicen pruebas de caracterización microbiológica a las excretas bovinas, además de la determinación de contenido lignocelulósico en los RSC, con la finalidad de fortalecer la información obtenida y evaluar las bacterias idóneas para el consumo de los RSC de acuerdo a su composición.

De acuerdo a la operación en modo batch del digester anaerobio, es recomendable la adaptación de una bomba adicional que sea exclusiva para la alimentación, con el motivo de facilitar la manipulación de los residuos al ingresarlos al digester.

La inoculación del digester resultó favorecedora, sin embargo es aconsejable que se realice por un periodo de 30 días y después se inicie el arranque del digester con una porción pequeña de RSC para que las bacterias se adapten desde un inicio a este tipo de residuo, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos, la adición de RSC pudo haberse realizado desde el lote 2, sin embargo se siguió operando con excretas bovinas con el motivo de observar si el rendimiento de metano aumentaba.

La adaptación del digester anaerobio resultó funcional durante todo el periodo de investigación, sin embargo es recomendable que sea acondicionado en su interior con un material capaz de retener biomasa y la comunidad bacteriana logre impregnarse de mejor manera en las paredes.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Alvarado-Lassmann, A. (2014). Implementación de un reactor anaerobio de geomembrana en un rancho de ganado vacuno. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria. ITO, Orizaba, Ver., Octubre 2014, 561-568.

Alvarez, R., Lidén, G. (2009). Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *Biomass and bioenergy*, 33(3), 527-533.

APHA. (1981). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 15ed.* APHA American Public Health Association.

Aragaw, T., Andargie, M., Gessesse, A. (2013). Co-digestion of cattle manure with organic kitchen waste to increase biogas production using rumen fluid as inoculums. *Int J Phys Sci*, 8, 443-450.

ASERCA (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria). (2010). Revista Claridades Agropecuarias. 197.

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Económico y Social) (2008). Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible, 320 p.

Braddock, R. J. (1995). By-products of citrus fruit. *Food Technology*, 49(9), 74-77.

Brinkman, J. (2008). Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries. In *Proceedings of the II International symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste. Barcelona* (190-191).

Brown, B. B., Yiridoe, E. K., Gordon, R. (2007). Impact of single versus multiple policy options on the economic feasibility of biogas energy production: Swine and dairy operations in Nova Scotia. *Energy Policy*, 35(9), 4597-4610.

Buffiere, P., Frederic, S., Marty, B., Delgenes, J. (2008). A comprehensive method for organic matter characterization in solid wastes in view of assessing their anaerobic biodegradability. *Water Science and Technology*. 58 (9) (1783-1788).

Carreón, R. O. E., Sabido, R. L. A., Centeno, L. S., Leal, R. L. J., Martínez, J. A., Fernández, S. M. T. (2009). Etanol carburante. *BioTecnología* 13(3): 79-102

Cendales, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la cogestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable, Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia.

Cerón-Salazar, I., Cardona-Alzate, C. (2011). Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja. *Ingeniería y Ciencia*, 7(13), 65-86.

CIEMAT. (2007). Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Energía de la Biomasa: Digestores Anaerobios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Madrid, España.

Cuervo, L., Folch, J. L., Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *BioTecnología* 13(3): 11-25.

Dareioti, M. A., Dokianakis, S. N., Stamatelatou, K., Zafiri, C., Kornaros, M., (2009). Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process. *Desalination* 248(1–3): 891-906.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *México Distrito Federal*, 8.

El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource technology*, 101(11), 4021-4028.

FAO, F. (2011). Agricultural Organization of the United Nations (2004). *FAO statistical yearbook 2005*, 6.

Gallardo Nieto, J. L., Luna-Martínez, E., Albarrán-Díaz, M. (2006). Situación actual y perspectiva de la producción de carne de bovino en México 2006. *Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación*.

Groppelli, E. (2005). El camino de la biodigestión. Boletín. Edit. Proteger. Universidad Nacional del Litoral. Argentina.

Gunaseelan, N. (2007). Regression models of ultimate methane yields of fruit and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresour. Technol.* Vol. 98, p.1270–1277.

IDEA. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: Digestores Anaerobios. Madrid, España.

Kaparaju, P. L. N., & Rintala, J. A. (2006). Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste. *Environmental technology*, 27(6), 623-633.

Koppar, A., Pullammanappallil, P. (2013). Anaerobic digestion of peel waste and wastewater for on site energy generation in a citrus processing facility. *Energy*, 60, 62-68.

Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J. P., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. (2005). Biomethane from dairy waste: a sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California. *USDA Rural Development*.

Lobato-Fuertes, A. (2012). Estudio de la codigestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales. Tesis de Doctorado. Universidad de León, México.

Lorenzo, Y., Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de Caña de Azúcar (ICIDCA) 1, 35-48.

Marañón, E., Fernández, Y., Castrillón, L. (2009). Manual de estado del arte de la codigestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales. *Universidad de Oviedo*.

Marín, F. R., Soler-Rivas, C., Benavente-García, O., Castillo, J., Pérez-Alvarez, J. A. (2007). By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chemistry*, 100(2), 736-741.

Martín, M. A., Siles, J. A., Chica, A. F., Martín, A. (2010). Biomethanization of orange peel waste. *Bioresource technology*, 101(23), 8993-8999.

Meléndez-Martínez, A. J., Britton, G., Vicario, I. M., Heredia, F. J. (2008). The complex carotenoid pattern of orange juices from concentrate. *Food Chemistry*, 109(3), 546-553.

Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., Omar, R., Idris, A. (2013). Batch and semi-continuous biogas production from cattle manure. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(1), 16-21.

NOM, Norma Oficial Mexicana. 004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. *Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*, 2002.

Ozbas, E., Tufekci, N., Yilmaz, G., Ovez, S. (2006). Aerobic and anaerobic treatment of fruit juice industry effluents. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 65. 830-837.

Pourbafrani, M., Forgács, G., Horváth, I. S., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J. (2010). Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource technology*, 101(11), 4246-4250.

Purser, B. J., Thai, S. M., Fritz, T., Esteves, S. R., Dinsdale, R. M., Guwy, A. J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water research*, 61, 162-170.

Raposo, F., Banks, C., Siegert, I., Heaven, S., Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*. 41 (6): 1444–1450.

Rezzadori, K., Benedetti, S., Amante, E. R. (2012). Proposals for the residues recovery: orange waste as raw material for new products. *Food and bioproducts processing*, 90(4), 606-614.

Rivas, B., Torrado, A., Torre, P., Converti, A., Domínguez, J. M. (2008). Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(7), 2380-2387.

Rojas, J. P., Perea, A., Stashenko, E.E. (2009). Obtención de aceites esenciales y pectinas a partir de subproductos de jugos cítricos. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica. Universidad de Antioquia*, Medellín, Colombia. 16: 110-115.

Romero–Figueiras, T. (2013). Alternativas para el aprovechamiento de la fracción sólida de los residuos de frutas y verduras. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba.

Roussos, P. A. (2011). Phytochemicals and antioxidant capacity of orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck cv. Salustiana) juice produced under organic and integrated farming system in Greece. *Scientia horticulturae*, 129(2), 253-258.

Row, J., Neabel, D. (2005). *Integrated Manure Utilization System Life-cycle Value Assessment*. Pembina Institute.

Ruiz, F. A., Sagarnaga, V. M. L., Salas, G. J. M., Mariscal, A. V., Estrella, Q. H., González, A. M., Juárez, Z. A. (2009). Impacto del TLCAN en la cadena de valor de bovinos para carne. *Universidad Autónoma Chapingo, Enero, México*.

Sandoval, C. J., Vergara, M., Carreño, M., Castillo, E. F. (2009). Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment. *Waste Management* 29(2): 704-711.

Satyanarayan, S., Murkute, P. (2008). Biogas production enhancement by Brassica compostries amendment in cattle dung digesters. *Biomass and Bioenergy*, 32(3), 210-215.

Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. La SMBB a 30 años de su fundación, 14.

SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). (2012). Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México.

SIAP (Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera). (2013). Consulta de indicadores de Producción, Precios y Márgenes de Comercialización Nacional de Naranja. [www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx)

Sowmeyan, R., Swaminathan, G. (2008). Performance of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic wastewater during start-up phase. *Bioresource technology*, 99(14), 6280-6284.

Tripodo, M. M., Lanuzza, F., Micali, G., Coppolino, R., Nucita, F. (2004). Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. *Bioresource Technology*, 91(2), 111-115.

United States Department of Agriculture (USDA), 1992. Agriculture Waste Management Field Handbook (Part 651). Chapter 4: Agricultural Waste Characteristics. USDA-National Resource Conservation Service, Washington, DC, USA.

USDA. (2010). Monografía de la naranja II. Dirección general adjunta de planeación estratégica y análisis sectorial. Artículo Técnico de producción. México. (1-3). [www.oedrusveracruz.gob.mx](http://www.oedrusveracruz.gob.mx)

Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147-2153.

Viuda-Martos, M., Fernandez-Lopez, J., Sayas-Barbera, E., Sendra, e., Perez-Alvarez, J. A. (2011). Physicochemical characterization of the orange juice waste water of a citrus by-product. *Journal of food processing and preservation*, 35(2), 264-271.

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource technology*, 99(17), 7928-7940.

Wilkins, M. R., Suryawati, L., Maness, N. O., Chrz, D. (2007a). Ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus* in the presence of orange-peel oil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(8), 1161-1168.

Wilkins, M. W., Grohmann, K. (2010). Simultaneous saccharification and fermentation of citrus peel waste by *Saccharomyces cerevisiae* to produce ethanol. *Process Biochem.* 42: 1614–1619

Xiguang, C. R. T. 2010. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. *Int. J. Agric. and Biol. Eng.*, 3 (4): 61-73.

Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., Orozco Sánchez, F. (2008). Agroindustrial waste valorization-fruits-in Medellin and the south of Valle de Aburra, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 61(1), 4422-4431.