



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UN RESIDUO SÓLIDO
ORGÁNICO CITRÍCOLA, UTILIZANDO UN INÓCULO
ESPECIALIZADO A NIVEL LABORATORIO”.

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

PRESENTA:

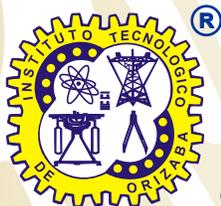
I.Q. Maribel Rodríguez de la Luz

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

SEPTIEMBRE 2019



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 05/09/2019
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. MARIBEL RODRIGUEZ DE LA LUZ
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:

"DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UN RESIDUO SÓLIDO ORGÁNICO CITRÍCOLA,
UTILIZANDO UN INÓCULO ESPECIALIZADO A NIVEL LABORATORIO".

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


MARIO LEONCIO ARRIJOA RODRIGUEZ
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

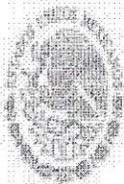


Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 19/08/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. DR. RUBEN POSADA GOMEZ
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. :

MARIBEL RODRIGUEZ DE LA LUZ

la cual lleva el título de:

**"DIGESTIÓN ANAEROBIA DE UN RESIDUO SÓLIDO ORGÁNICO CITRÍCOLA,
UTILIZANDO UN INÓCULO ESPECIALIZADO A NIVEL LABORATORIO".**

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 : M.I. **ADRIAN REYES BENITEZ**

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

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

OPCION: **I** **Tesis**



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx



DEDICATORIAS

A Dios por permitirme entrar a estudiar la maestría y aun a pesar de lo difícil que fue siempre estuvo a mi lado, acompañándome y guiándome en todo momento. Gracias por no soltar mi mano y ayudarme a superar todas las adversidades que se presentaron en mi camino.

A la Virgen María por interceder siempre por mí ante tu santísimo hijo Jesucristo, ya que sin tu ayuda jamás hubiera logrado entrar y terminar la maestría. Gracias por creer en mí y por guiarme siempre en los momentos más difíciles de mi vida.

A la Virgen de Juquila, a todos los Santos y a las Ánimas benditas del purgatorio, por siempre acompañarme y guiarme en todo momento.

A mis padres María Isabel y Humberto por su total apoyo, fortaleza, tolerancia y comprensión. Gracias por alentarme siempre a ser alguien mejor y por acompañarme siempre en los momentos más difíciles de mi vida. Ustedes son los pilares de mi vida, por lo que con todo mi amor les dedico este trabajo.

A mis hermanas Erika y Liliana y a mi hermano Juan Pablo, por su apoyo incondicional y por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas. Gracias por permitirme lograr este sueño y animarme siempre. Con todo mi cariño les dedico esta tesis.

A mis hijos Ximena y Emiliano por ser los motores de mi vida. Gracias a ustedes pude lograr esta meta, aun a pesar de las múltiples dificultades que se interpusieron en mi camino, por ustedes fui capaz de superarlo todo. Espero ser un ejemplo para ustedes y que siempre estén orgullosos de mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la M.I.Q. Norma A. Vallejo Cantú por dirigir este trabajo, por sus recomendaciones, paciencia, amabilidad y por las facilidades que me brindo para poder desarrollar este proyecto.

Al Dr. Alejandro Alvarado Lassman por sus asesorías y observaciones durante todo el periodo de trabajo y por las recomendaciones y consejos que hicieron posible la realización de esta investigación.

Al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras y al M.I.A. Adrián Reyes Benítez por sus observaciones y recomendaciones durante las revisiones de este trabajo.

A mi tutora la Dra. Rosalia Cerecero Enríquez por sus consejos y gentileza en cada tutoría.

A CONACYT por otorgarme la beca durante estos 2 años para realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

Digestión anaerobia de un residuo sólido orgánico citrícola, utilizando un inóculo especializado a nivel laboratorio

Elaborado por: I.Q. Maribel Rodríguez de la Luz

Dirigida 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 a su pH ácido característico y su elevada concentración de materia orgánica presente. Así mismo otro residuo que genera un gran impacto ambiental son las excretas bovinas, las cuales provocan la eutrofización del agua así como gases de efecto invernadero. Por lo cual una opción viable para el aprovechamiento de estos residuos es la digestión anaerobia, la cual puede producir combustibles en forma de gas metano. Sin embargo debido a que las excretas bovinas contienen diversos microorganismos patógenos el uso de este tipo de inóculo en la industria citrícola no es viable.

Por esta razón el objetivo de este trabajo fue realizar un pretratamiento térmico a las excretas bovinas a una temperatura de 90 °C durante 1 hora, con la finalidad de eliminar los microorganismos patógenos presentes. Posteriormente se llevaron a cabo pruebas de biodegradabilidad del Inóculo Pretratado Térmicamente (IPT) con el Residuo Sólido Orgánico Citrícola (RSOC) así como de otras mezclas, en donde se evaluó la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás. En base a los datos obtenidos en las pruebas de biodegradabilidad se determinó que la relación inóculo/sustrato (IPT/RSOC) sería de 90/10 y se realizarían 3 lotes, donde se alcanzaron remociones de 41.31, 56.75 y 45.89 % de DQO, obteniendo rendimientos de metano de 1.7850, 3.0699 y 1.2267 LCH₄/g DQO_{rem} respectivamente.

Después de operar el digestor en modo batch se comenzó a operar en modo semicontinuo, en donde se alcanzaron remociones de 32.31, 18.79 y 11.25 % de DQO y rendimientos de metano de 2.5943, 1.0318 y 0.1359 LCH₄/g DQO_{rem} respectivamente, los cuales fueron menores a los obtenidos en el proceso en modo batch. Sin embargo aun a pesar de la disminución del rendimiento de metano y las remociones de DQO bajas, se concluye que la digestión anaerobia de los RSOC con el IPT es posible si se mantiene cuidado en los parámetros como el pH y las concentraciones de sustrato e inóculo.

ABSTRACT

Anaerobic digestion of a solid organic citrus residue, using a specialized inoculum at laboratory level

By: I.Q. Maribel Rodríguez de la Luz

Advisor(s): 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 present. Likewise, another waste that generates a great environmental impact is bovine excreta, which cause the eutrophication of water as well as greenhouse gases. Therefore, a viable option for the use of this waste is anaerobic digestion, which can produce fuels in the form of methane gas. However, because bovine excreta contain various pathogenic microorganisms, the use of this type of inoculum in the citrus industry is not viable.

For this reason the objective of this work was to perform a thermal pretreatment to bovine excreta at a temperature of 90 °C for 1 hour, in order to eliminate the pathogenic microorganisms present. Subsequently, biodegradability tests were carried out on the Thermally Pretreated Inoculum (TPI) with the Solid Organic Citrus Residue (SOCR) as well as other mixtures, where the degradation of the organic matter and the biogas production were evaluated. Based on the data obtained in the biodegradability tests, it was determined that the inoculum/substrate ratio (TPI/SOCR) would be 90/10 and 3 lots would be carried out, where removals of 41.31, 56.75 and 45.89 % of COD were achieved, obtaining methane yields of 1.7850, 3.0699 and 1.2267 LCH₄/g COD_{rem} respectively.

After operating the digester in batch mode, it started to operate in semi-continuous mode, where removals of 32.31, 18.79 and 11.25 % of COD and methane yields of 2.5943, 1.0318 and 0.1359 LCH₄/g COD_{rem} respectively were reached, which were lower to those obtained in the process in batch mode. However, despite the decrease in methane yield and low COD removal, it is concluded that the anaerobic digestion of SOCR with TPI is possible if kept carefully in parameters such as pH and substrate and inoculum concentrations.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| OBJETIVOS..... | 3 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 4 |
| 1.1. Generalidades de la naranja..... | 5 |
| 1.1.1. Variedades de naranja en México..... | 6 |
| 1.1.2. Composición de la naranja..... | 7 |
| 1.1.3. Composición química de la naranja..... | 8 |
| 1.2. Distribución mundial de los cítricos..... | 10 |
| 1.2.1. Producción cítrica en México..... | 11 |
| 1.3. Industria cítrica..... | 12 |
| 1.3.1. Impacto ambiental de los residuos cítricos..... | 13 |
| 1.3.2. Características y propiedades de los residuos cítricos..... | 14 |
| 1.3.3. Usos actuales del residuo cítrico..... | 15 |
| 1.4. Panorama de la industria ganadera en México..... | 16 |
| 1.4.1. Impacto ambiental de los residuos de ganado bovino..... | 17 |
| 1.4.2. Características y propiedades de las excretas bovinas..... | 19 |
| 1.4.3. Usos actuales de las excretas bovinas..... | 20 |
| 1.5. Digestión anaerobia..... | 20 |
| 1.5.1. Etapas de la digestión anaerobia..... | 21 |
| 1.5.2. Reactores de digestión anaerobia..... | 23 |
| 1.6. Inóculo..... | 25 |
| 1.7. Pretratamiento térmico..... | 27 |
| CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS..... | 31 |
| 2.1. Características del digestor anaerobio..... | 32 |
| 2.2. Desarrollo del inóculo..... | 33 |
| 2.3. Obtención del residuo sólido orgánico cítrico..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4. Inactivación de patógenos del inóculo..... | 35 |
| 2.5. Caracterización del inóculo, IPT y RSOC..... | 36 |
| 2.6. Análisis y determinación de los parámetros fisicoquímicos..... | 37 |
| 2.6.1. Determinación de ST y STV..... | 37 |
| 2.6.2. Determinación de pH..... | 38 |
| 2.6.3. Determinación de DQO..... | 39 |
| 2.6.4. Determinación de Carbohidratos..... | 39 |
| 2.6.5. Determinación de Proteínas..... | 40 |
| 2.6.6. Determinación de Grasas y Aceites..... | 41 |
| 2.6.7. Composición de biogás..... | 41 |
| 2.7. Pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio..... | 42 |
| 2.8. Montaje del reactor anaerobio a nivel laboratorio en modo Batch..... | 43 |
| 2.9. Cambio de la operación del reactor anaerobio a modo semicontinuo..... | 45 |
| 2.9.1. Adaptación de la alimentación..... | 45 |
| 2.10. Evaluación de la digestión anaerobia en modo batch y en modo semicontinuo..... | 46 |
| CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 47 |
| 3.1. Desarrollo y obtención del inóculo..... | 48 |
| 3.2. Obtención del RSOC..... | 48 |
| 3.3. Inactivación de patógenos del inóculo..... | 48 |
| 3.4. Caracterización del Inóculo, IPT y RSOC..... | 49 |
| 3.5. Pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio..... | 51 |
| 3.6. Operación del reactor anaerobio en modo batch..... | 58 |
| 3.7. Cambio de operación del reactor anaerobio a modo semicontinuo..... | 63 |
| 3.8. Evaluación de la digestión anaerobia en modo batch y en modo semicontinuo..... | 65 |
| CONCLUSIONES..... | 70 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pag. | |
|------|--|----|
| 1.1 | Árbol de naranja | 5 |
| 1.2 | Partes principales de la naranja | 8 |
| 1.3 | Distribución porcentual de la producción mundial de cítricos | 10 |
| 1.4 | Principales estados productores de cítricos | 11 |
| 1.5 | Diagrama de productos y subproductos de la naranja | 12 |
| 1.6 | Gráfica de la generación anual promedio de RME en México | 18 |
| 1.7 | Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos | 22 |
| 2.1 | Etapas de la metodología general para esta investigación | 31 |
| 2.2 | Digestor anaerobio | 32 |
| 2.3 | Dilución de las excretas bovinas | 34 |
| 2.4 | Obtención del inóculo | 34 |
| 2.5 | Obtención del RSOC | 35 |
| 2.6 | Metodología para la inactivación de patógenos | 36 |
| 2.7 | Baño termostático | 36 |
| 2.8 | Balanza analítica, estufa y mufla | 38 |
| 2.9 | Potenciómetro | 38 |
| 2.10 | Centrífuga, placa digestora y espectrofotómetro | 39 |
| 2.11 | Placa de calentamiento y espectrofotómetro | 40 |
| 2.12 | Equipo Kjeldahl | 40 |
| 2.13 | Extractor Soxhlet | 41 |
| 2.14 | Cromatógrafo de gases | 42 |
| 2.15 | Cinéticas evaluadas | 43 |
| 2.16 | Reactor anaerobio | 43 |
| 2.17 | Reactor anaerobio en modo batch | 44 |
| 3.1 | a) Baño termostático y b) Controlador de temperatura | 49 |
| 3.2 | Comportamiento de los ST | 51 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.3 | Comportamiento de los STV | 52 |
| 3.4 | Monitoreo del pH | 54 |
| 3.5 | Comportamiento de la DQO | 55 |
| 3.6 | Producción de biogás | 56 |
| 3.7 | Porcentaje de metano | 57 |
| 3.8 | Comportamiento del pH | 59 |
| 3.9 | Comportamiento de la DQO | 59 |
| 3.10 | Comportamiento de los ST y STV | 60 |
| 3.11 | Porcentaje de metano en modo batch | 62 |
| 3.12 | Porcentaje de remoción de ST, STV y DQO | 63 |
| 3.13 | Porcentaje de metano en modo semicontinuo | 64 |
| 3.14 | Comparación del porcentaje de metano en modo batch y semicontinuo | 67 |

LISTA DE TABLAS

| | Pag. |
|--|------|
| 1.1 Composición química de la naranja Valencia (Cantidad contenida en 100 g) | 9 |
| 1.2 Propiedades de los residuos cítricos (Cantidad contenida en 100 g) | 14 |
| 1.3 Caracterización de los residuos cítricos | 14 |
| 1.4 Volumen de producción de las principales entidades productoras | 17 |
| 1.5 Caracterización de excretas bovinas | 19 |
| 1.6 Diferentes fuentes de inóculos para reactores anaerobios | 26 |
| 2.1 Características del Digestor Anaerobio (DA) | 33 |
| 2.2 Parámetros empleados en la caracterización | 37 |
| 2.3 Mezclas utilizadas en pruebas de biodegradabilidad del IPT | 42 |
| 2.4 Arreglo del reactor en modo batch | 44 |
| 2.5 Arreglo del reactor en modo semicontinuo | 46 |
| 3.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del inóculo, IPT y RSOC | 50 |
| 3.2 Degradación de los ST en cinéticas de biodegradabilidad | 52 |
| 3.3 Degradación de los STV en cinéticas de biodegradabilidad | 53 |
| 3.4 Degradación de la DQO en cinéticas de biodegradabilidad | 55 |
| 3.5 Producción de biogás y rendimientos de metano | 58 |
| 3.6 Degradación de la DQO | 60 |
| 3.7 Remoción de materia orgánica de los ST y STV | 61 |
| 3.8 Producción de biogás y rendimientos de metano en modo batch | 62 |
| 3.9 Remoción de materia orgánica de los ST, STV y DQO | 64 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.10 | Producción de biogás y rendimientos de metano en modo semicontinuo | 65 |
| 3.11 | Comparación de la remoción de los ST y STV en modo batch y semicontinuo | 66 |
| 3.12 | Comparación de la remoción de la DQO en modo batch y semicontinuo | 66 |
| 3.13 | Comparación de la producción de biogás y rendimientos de metano en modo batch y en modo semicontinuo | 68 |

NOMENCLATURA

| Abreviatura | Significado |
|-----------------|-------------------------------------|
| DQO | Demanda Química de Oxígeno |
| ST | Sólidos Totales |
| STV | Sólidos Totales Volátiles |
| SSV | Sólidos Suspendidos Volátiles |
| pH | Potencial de Hidrógeno |
| NMP | Número Más Probable |
| HH | Huevos de Helminfos |
| IPT | Inóculo Pretratado Térmicamente |
| RSOC | Residuo Sólido Orgánico Citrícola |
| RSFV | Residuo Sólido de Frutas y Verduras |
| CVA | Carga Volumétrica Aplicada |
| rem | Removidos |
| Y | Rendimiento de metano |
| m/m | masa/masa |
| L | Litros |
| mL | Mililitros |
| d | Días |
| W | Watts |
| CH ₄ | Metano |
| g | Gramos |
| % | Porciento |
| °C | Grado Centígrado |

INTRODUCCIÓN

México es uno de los principales productores de cítricos, ocupando el quinto lugar a nivel mundial con aproximadamente 7.4 millones de toneladas anuales, de las cuales 4.08 toneladas corresponden a naranja (SIAP, 2015). Los estados con mayor producción de cítricos son Veracruz, Tamaulipas y San Luis Potosí, los cuales representan el 67.9 % del total cosechado en el país (SAGARPA, 2017).

En 2013, México procesó 1.5 millones de toneladas de naranja de las cuales se obtuvieron productos como jugo fresco y concentrado, aromas, aceites y cáscara seca. Actualmente el procesamiento de naranja genera 0.7 millones de toneladas por año de residuos sólidos cítricos (Rosas-Mendoza et al., 2016), y aunque estos residuos pueden ser reutilizados para una amplia variedad de propósitos, hasta hace relativamente poco no había medios satisfactorios de eliminación que no fueran vertirlos en terrenos adyacentes a los sitios de producción, en la fabricación de alimentos para el ganado o la quema. Sin embargo la disposición final incorrecta genera serios problemas de contaminación debido a su pH ácido y alta concentración de materia orgánica (Martín et al., 2010).

Así mismo otra actividad que produce un gran impacto ambiental es la industria ganadera, la cual generó entre el 2006-2012, un total de 66.7 millones de toneladas de excretas de ganado bovino y porcino, las cuales son responsables de la eutrofización del agua, emisiones de gases de efecto invernadero así como malos olores en el aire y la acumulación excesiva de nutrientes en los suelos (SEMARNAT, 2012 y Ruvalcaba et al., 2012).

Es por ello que una alternativa para el uso de los residuos cítricos y las excretas de ganado bovino es la digestión anaerobia. La cual es un proceso bioquímico muy eficiente para convertir la biomasa en biocombustible gaseoso, gracias a las condiciones de operación suaves y los requerimientos energéticos muy bajos. La

producción de biogás rico en metano es una fuente renovable de energía, la cual evita el vertido de materiales orgánicos biodegradables (por ejemplo, alimentos y residuos agroindustriales), reduciendo así las emisiones de metano de los vertederos (Calabró et al., 2015).

Por tales razones en el presente trabajo se evaluará la digestión anaerobia (en modo Batch y en modo semicontinuo) de los residuos sólidos orgánicos cítricos, utilizando un inóculo especializado (excretas de ganado bovino) a nivel laboratorio, el cual se desarrollará y se le inactivarán los patógenos mediante un pretratamiento térmico.

En el capítulo 1 se presentan las generalidades y composición de la naranja, así como un panorama actual de la industria cítrica a nivel mundial y en nuestro país, posteriormente se analiza la problemática ambiental de los residuos cítricos como los generados en la industria ganadera para finalmente analizar el papel de la digestión anaerobia y el pretratamiento térmico de las excretas bovinas. En el capítulo 2 se presentan los materiales, métodos y técnicas que se utilizaron para desarrollar el inóculo especializado y posteriormente evaluar el potencial de biodegradabilidad del residuo cítrico con el inóculo tanto en modo batch como en modo semicontinuo con la finalidad de lograr los objetivos planteados en este trabajo. Finalmente en el capítulo 3 se presentan los resultados de esta tesis, así como el análisis, comparación y discusión de estos, con los cuales se generan las conclusiones del presente trabajo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar la digestión anaerobia de un residuo sólido orgánico citrícola, utilizando un inóculo especializado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar el inóculo especializado a partir de excretas de ganado bovino y con inactivación de patógenos.
2. Realizar el montaje del reactor anaerobio a nivel laboratorio en modo batch.
3. Establecer la operación del reactor en modo semicontinuo.
4. Evaluar la digestión anaerobia con el inóculo pretratado y la producción de biogás.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Generalidades de la naranja

La naranja es un cultivo perenne que se desarrolla bien en zonas tropicales y subtropicales desde los 200 hasta 1,200 metros sobre el nivel del mar; resiste temperaturas comprendidas entre el rango de 10 a 50 °C y una precipitación anual de 200-1500 mm. La cosecha de naranja se realiza prácticamente todo el año, el periodo de mínima cosecha abarca del mes de julio hasta agosto; de septiembre a noviembre y de abril a junio se tiene cosecha media y de diciembre a marzo, ocurre la máxima cosecha. Por su periodo de maduración se clasifica en: temprana, de media estación y tardías. En los climas subtropicales, los cultivos de madurez temprana alcanzan esta generalmente en un plazo de 6-9 meses después de producirse la floración completa, las de media estación en 9-12 meses y las de maduración tardía en 12 meses (Santiago-Falcón, 2006).



Figura 1.1 Árbol de naranja (Ancillo y Medina, 2014)

La naranja pertenece a la familia *Rutaceae*, genero *Citrus* y especie *Citrus sinensis*. El árbol de naranja es reducido, mide de 6 a 10 m de alto, sus ramas son poco vigorosas y tiene tronco corto, como se observa en la Figura 1.1. Las hojas de los árboles son limbo grandes esparcidas y de color verde oscuro, las flores son blancas y aromáticas (Santiago-Falcón, 2006).

1.1.1. Variedades de naranja en México

Las principales variedades cultivadas en México son la *valencia*, la *navel-lane-late* y la *navelina* (SIAP, 2009):

- La naranja *valencia* o naranja dulce como es conocida, es uno de los árboles frutales más cultivados del mundo. Su origen se sitúa entre el sur de China y el nordeste de la India. Es un híbrido interespecífico entre zamboa y mandarino. El término castellano *naranja* proviene del nombre local *narang* que le otorgaban en la antigua Persia. El gran número de variedades existentes se clasifican en cuatro grupos: grupo Navel, grupo Blancas, grupo Sangre y grupo Sucreñas. Su época de producción inicia en mayo, es jugosa y dulce y por ello está muy orientada a la producción de jugo (Ancillo y Medina, 2014).
- La *navel-lane-late* se detectó en 1950 en Australia con mutación espontánea de Washington Navel. El árbol es vigoroso, grande, muy productivo y precoz en la entrada de producción. El fruto es grande, de color naranja, presenta una extraordinaria adherencia al pedúnculo y se mantiene en el árbol en excelentes condiciones comerciales durante mucho tiempo. Se produce a partir de febrero y es una fruta destinada a la mesa del consumidor (SIAP, 2009).
- Por su parte, la *navelina* no tiene orígenes bien conocidos, sin embargo se cree que apareció en California por mutación espontánea. El árbol es vigoroso y de buen desarrollo. El fruto es grande y de excelente calidad, sin semillas. El

índice de madurez lleva un adelanto medio de unas dos semanas respecto al de Washington Navel. Es productiva, y aunque está bien adaptada a la mayor parte de nuestras áreas productoras es en las zonas precoces donde su cultivo presenta mayor interés. Sirve tanto para la mesa como para la producción de jugos. Es altamente valorada porque tiene una producción muy alta que inicia en diciembre (EARTH, 2004 y SIAP, 2009).

1.1.2. Composición de la naranja

Las principales partes que conforman a la naranja de acuerdo a la Figura 1.2, son las siguientes (Santiago-Falcón, 2006):

- Flavedo (10 %): Es una capa de tejido que está delineando la epidermis y en él, abundan vesículas o celdillas que contienen lípidos, aceites esenciales y cromoplastos (carotenoides), es la porción colorida de la cáscara.
- Albedo (12–30 %): Se encuentra debajo del flavedo; es una capa de tejido esponjoso, blanco y celulósico, el cual constituye la mayor parte de la corteza. El mismo tejido forma el corazón o eje central del fruto, que junto con el flavedo contienen el sistema vascular, el cual suministra a la fruta de agua y nutrientes.
- La cáscara o pericarpio (20–50 %): Es el flavedo y el albedo juntos.
- Endocarpio (50–80 %): Se encuentra dentro de la cáscara y es la parte comestible de los cítricos, es comúnmente llamada pulpa, está formado por muchos carpelos o segmentos, que a su vez, están compuestos por vesículas que contienen el jugo y están separados por las membranas intercapilares.
- Jugo (35–50 %): Es el contenido de las vesículas, extraído manual o mecánicamente. El jugo contiene suspendidos componentes solubles y partículas en suspensión tales como: Cromoplastos, vesículas, fragmentos de tejido y pectinas entre otros.

- Semillas: De cubierta dura, lignocelulósica, contiene una importante cantidad de grasa.

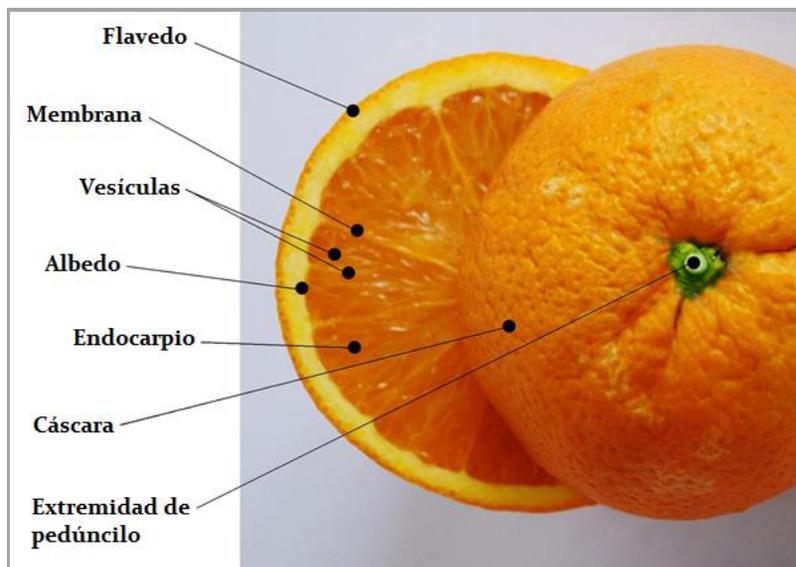


Figura 1.2 Partes principales de la naranja

1.1.3. Composición química de la naranja

Los componentes químicos de la naranja son principalmente agua, azúcares solubles, fibra dietética, ácidos orgánicos, aminoácidos y proteínas, minerales, aceites y lípidos, también contienen flavonoides y vitaminas, como se muestra en la Tabla 1.1 (Luis-Garcez, 2015).

Todos estos componentes son encontrados en diferentes cantidades dependiendo de la fracción de la fruta (jugo, albedo, flavedo, pulpa y semilla). La dulzura que contienen las frutas cítricas se debe a la presencia de glucosa, fructuosa y sacarosa, los azúcares pueden variar desde 1 % para limones hasta 9 % para algunas naranjas. La acidez es principalmente debida al ácido cítrico. El color de la naranja y mandarinas es debido a los carotenoides y xantofilas, como la clorofila en la cáscara de éstos cítricos disminuye, los carotenoides aumentan (Santiago-Falcón, 2006).

Los lípidos presentes en la cáscara son principalmente ceras, resinas y aceites esenciales, estos últimos representan la fracción aromática más importante del fruto aproximadamente contienen del 0.2–0.5 %, están constituidos por una mezcla compleja de compuestos principalmente alcoholes, fenoles, ácidos, aldehídos, cetonas y sobre todo una alta cantidad de terpenos (90 % básicamente monoterpenos como el limoneno), los cuales son susceptibles a la oxidación (Santiago-Falcón, 2006).

Tabla 1.1 Composición química de la naranja Valencia (Cantidad contenida en 100 g)

| Componente | Unidad | Naranja | Naranja con cáscara | Cáscara de naranja |
|------------------|--------|---------|---------------------|--------------------|
| 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 |
| 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 |

1.2. Distribución mundial de los cítricos

Los cítricos son considerados la fruta universal ya que están presentes en más de 100 países y son el grupo de frutas más importante económicamente, abarcando un 20 % del mercado mundial de frutas. De acuerdo a la FAO (por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization) en el año 2013 la superficie mundial plantada con cítricos fue de 8.3 millones de hectáreas, representando una producción de 123.8 millones de toneladas, correspondiendo al 58 % a naranja, 23 % a mandarina, 12 % a limones y 7 % a toronjas, como se muestra en la Figura 1.3. En el caso de cítricos dulces (naranja, toronja y mandarina) se registró una superficie mundial de 7.3 millones de hectáreas que producen 108.6 millones de toneladas (CDANL, 2015).

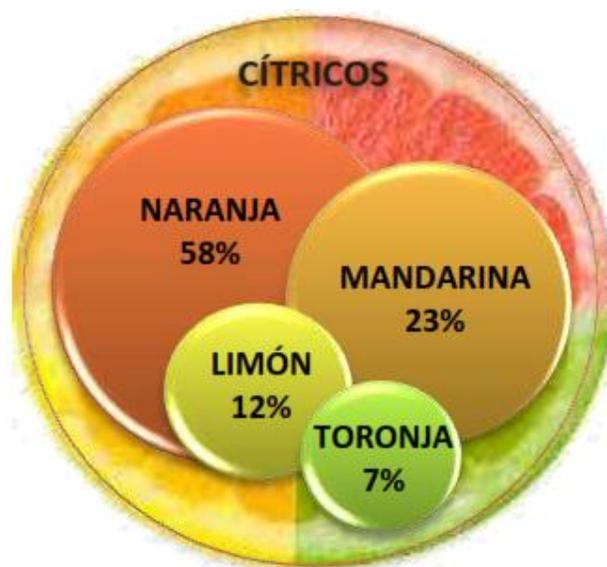


Figura 1.3. Distribución porcentual de la producción mundial de los cítricos

Actualmente, la mayor parte de la cosecha de cítricos proviene de un pequeño grupo de 10 países, los cuales representan el 77 % de la producción, donde China y Brasil lideran produciendo el 42 %, ocupando México la quinta posición después de los EUA (CDANL, 2015).

1.2.1. Producción cítrica en México

De acuerdo a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México se consolida como el quinto productor mundial de naranja, con un volumen promedio de 4.2 millones de toneladas, las cuales se comercializan tanto en el mercado interno como en destinos internacionales. Las principales entidades productoras de este cítrico son Veracruz, quien aporta el 44.5 % del volumen nacional; Tamaulipas, 14.6 %, y San Luis Potosí, 8.8 %, estados que conjuntan el 67.9 % del total cosechado en el país, como se puede observar en la Figura 1.4. Algunos otros estados productores de cítrico son Nuevo León, Puebla, Yucatán, Sonora, Tabasco, Hidalgo y Oaxaca, entre otros (SAGARPA, 2017).

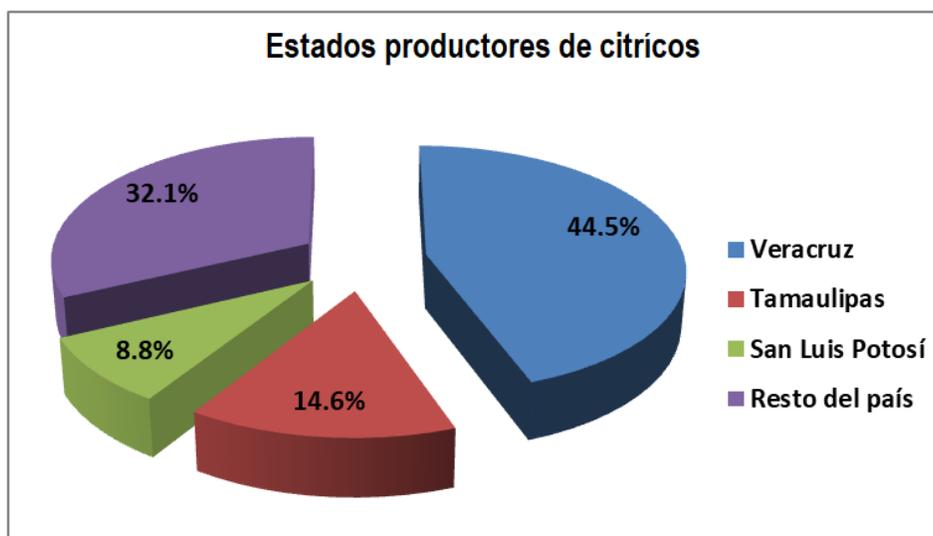


Figura 1.4 Principales estados productores de cítricos

Estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, contenidas en el Atlas Agroalimentario 2016, señalaron que durante el 2015 se produjeron 4.5 millones de toneladas, superior al promedio de los últimos 10 años (SAGARPA, 2017).

1.3. Industria cítrica

La citricultura constituye una de las actividades más importantes en la agricultura nacional, debido a que constituye una fuente importante de trabajo y genera una importante demanda de insumos y servicios tales como: fertilizantes, energéticos, lubricantes, materiales de empaque, auto-transporte, servicios profesionales especializados, entre otros bienes y servicios (Pantoja y Flores, 2018).

Los cítricos se pueden comercializar como fruta en fresco, jugo natural, jugo concentrado, pulpa refrigerada en forma de gajos, aceites esenciales, mermeladas y jaleas, residuos de pulpa, cáscara deshidratada, melazas para alimentación del ganado, entre otros. Algunos de estos productos y subproductos se muestran en la Figura 1.5 (CEES-ITESM, 1994).

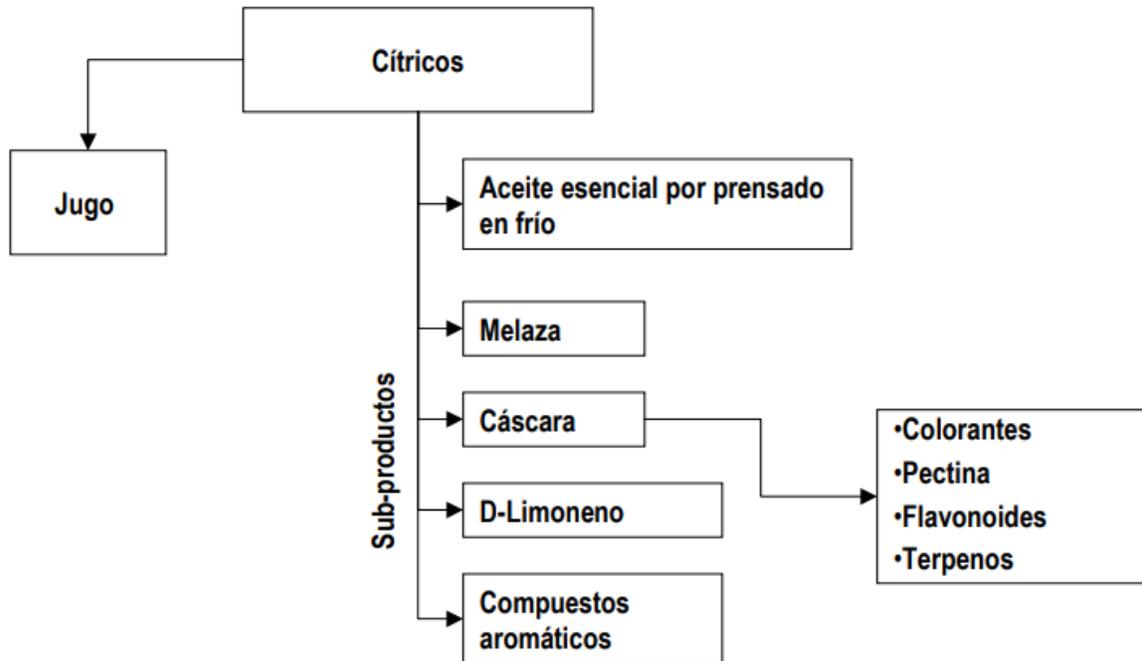


Figura 1.5 Diagrama de productos y subproductos de la naranja

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). 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, como la obtención de aceites esenciales que se extraen de las células localizadas en el flavedo (parte externa coloreada de la cáscara) de los frutos cítricos (Chávez y Aguilar, 2012).

1.3.1. Impacto ambiental de los residuos cítricos

Dentro de la industria citrícola, el 40–60 % de las naranjas que se procesan para la producción de jugo, el 50–60 % termina como residuo. La generación de estos residuos sólidos se estima en el rango de 15 a 25 millones de toneladas por año. Entre estos residuos, la cáscara de naranja es el componente principal que representa aproximadamente el 44 % del peso de la masa de la fruta (Wikandari et al., 2014).

Los residuos cítricos se componen principalmente de: (a) los residuos generados por la industria de jugos, que consiste en la cáscara, semillas y pulpa prensada; (b) fruta desechada por razones comerciales, como por ejemplo la fruta dañada y (c) la fruta descartada debido a regulaciones que limitan la producción (Ruiz y Flotats, 2014).

Estos residuos en muchos de los casos se eliminan de manera incontrolada cerca del lugar de producción, lo que puede dar lugar a varios problemas (por ejemplo, emisión de olores, metano y amoníaco, contaminación de las aguas dulces y subterráneas) (Calabro et al., 2015).

1.3.2. Características y propiedades de los residuos cítricos

Existen diversos 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 (Luis-Garcez, 2015). En la Tabla 1.2 se muestran los múltiples compuestos de los residuos cítricos.

Tabla 1.2 Propiedades de los residuos cítricos (Cantidad contenida en 100 g)

| Componente | Unidad | Rivas et al., 2008 | Pourbafrani et al., 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 1.3 se observa la comparación de la caracterización fisicoquímica reportada por dos diferentes trabajos.

Tabla 1.3 Caracterización de los residuos cítricos

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

Los resultados reportados de las caracterizaciones varían en función del sustrato utilizado ya sea la cáscara, la cáscara con pulpa o el agua residual de la industria citrícola. Sin embargo presentan algo en común que es el pH ácido y su gran cantidad de carga orgánica.

1.3.3. Usos actuales del residuo cítrico

México es un generador importante de desechos sólidos cítricos (por ejemplo de cáscara), los cuales provienen de la industria citrícola, principalmente del procesado de la fruta para la obtención de jugos. Dicho residuo normalmente se deposita en tiraderos a suelo abierto, lo que genera un problema serio de contaminación. Sin embargo en las últimas décadas se han fortalecido los procesos biocatalíticos debido a grandes tendencias de la síntesis química actual, como el desarrollo sostenible, la química verde y los procesos ambientales benignos. Las diversas industrias que buscan seguir e implementar estas pautas, en su mayoría se encuentran dedicadas a la elaboración continua de productos farmacéuticos, alimenticios y agroindustriales (Chávez y Aguilar, 2012).

Por lo cual un gran número de propuestas prometedoras para la utilización de los residuos de cáscara de naranja se han descrito en literatura. Estos incluyen el uso de los residuos para producir fertilizantes, en la obtención de aceites esenciales, obtención de productos químicos tales como la pectina, etanol, enzimas industriales y proteínas, así mismo se ha probado su uso como adsorbente químico y como suplemento para la pulpa del papel (Rezaadori et al., 2012).

Actualmente los residuos cítricos de la industria de fabricación de jugos, se utilizan como alimento para el ganado, gracias a su valor nutritivo, que es similar a la de grano de cebada o pulpa de remolacha azucarera. Esto es debido a su alto contenido de carbohidratos, la proporción significativa de componentes de la pared celular y su

bajo grado de lignificación. Sin embargo, el mercado para este material se está saturando (Ruiz y Flotats, 2014).

Otra alternativa es la producción de energía mediante el uso de los residuos de cáscara de naranja como sustrato para la producción de biometano en la digestión anaerobia. La cual es un proceso bioquímico muy eficiente para convertir la biomasa en biocombustible gaseoso, gracias a las condiciones de operación suaves y los requerimientos energéticos muy bajos. La producción de biogás rico en metano es una fuente renovable de energía, la cual evita el vertido de materiales orgánicos biodegradables (por ejemplo, alimentos y residuos agroindustriales), reduciendo así las emisiones de metano de los vertederos (Calabró et al., 2015).

1.4. Panorama de la industria ganadera en México

La ganadería bovina en México representa una de las principales actividades del sector agropecuario, por la contribución que realiza a la oferta de productos cárnicos, así como su participación en la balanza comercial del país. Tan solo en el año 2015 la producción de carne en canal de bovino fue de 1.84 millones de toneladas, lo que es producto de un crecimiento promedio anual de 1.7 % entre 2006 y 2015. Así mismo, en lo que respecta a la producción de carne de bovino por entidad federativa, durante el 2015 aproximadamente el 60 % de la producción nacional se concentró en diez entidades, como se puede observar en la Tabla 1.4. En donde Veracruz produjo el 13.5 % del total nacional, Jalisco 11 %, Chiapas 6.2 %, mientras que Sinaloa, Baja California, Michoacán, San Luis Potosí, Sonora, Chihuahua y Tabasco aportaron en conjunto el 29.4 % de la producción nacional del cárnico (FIRA, 2016).

Como se puede observar, el sector ganadero es muy importante debido a que representa una parte de la economía nacional, lo que se traduce en bienestar social y mejoramiento de la calidad de vida para las personas que se involucran en estas actividades agropecuarias (Luis-Garcez, 2015).

Tabla 1.4 Volumen de producción de las principales entidades productoras (SIAP-SAGARPA, 2016)

| Rank | Entidades Federativas | Volumen (toneladas) | Variación (%) 2014-2015 |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| Total nacional | | 1,845,236 | 1.0 |
| 1 | Veracruz | 249,222 | 2.2 |
| 2 | Jalisco | 203,644 | -0.5 |
| 3 | Chiapas | 114,710 | 1.0 |
| 4 | Sinaloa | 90,074 | -2.0 |
| 5 | San Luis Potosí | 87,860 | 9.9 |
| 6 | Baja California | 87,655 | 0.7 |
| 7 | Durango | 79,251 | 37.0 |
| 8 | Michoacán | 75,898 | 1.5 |
| 9 | Chihuahua | 71,876 | -0.7 |
| 10 | Sonora | 71,727 | -1.7 |
| | Resto | 713,319 | -2.1 |

1.4.1. Impacto ambiental de los residuos de ganado bovino

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), los residuos se clasifican en tres grandes grupos: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP) (LGPGIR, 2015).

- Los RSU son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (p. e., de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (SEMARNAT, 2012).

- Los RME son aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.
- Los RP son aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-infecciosos, B), así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados (SEMARNAT, 2012).

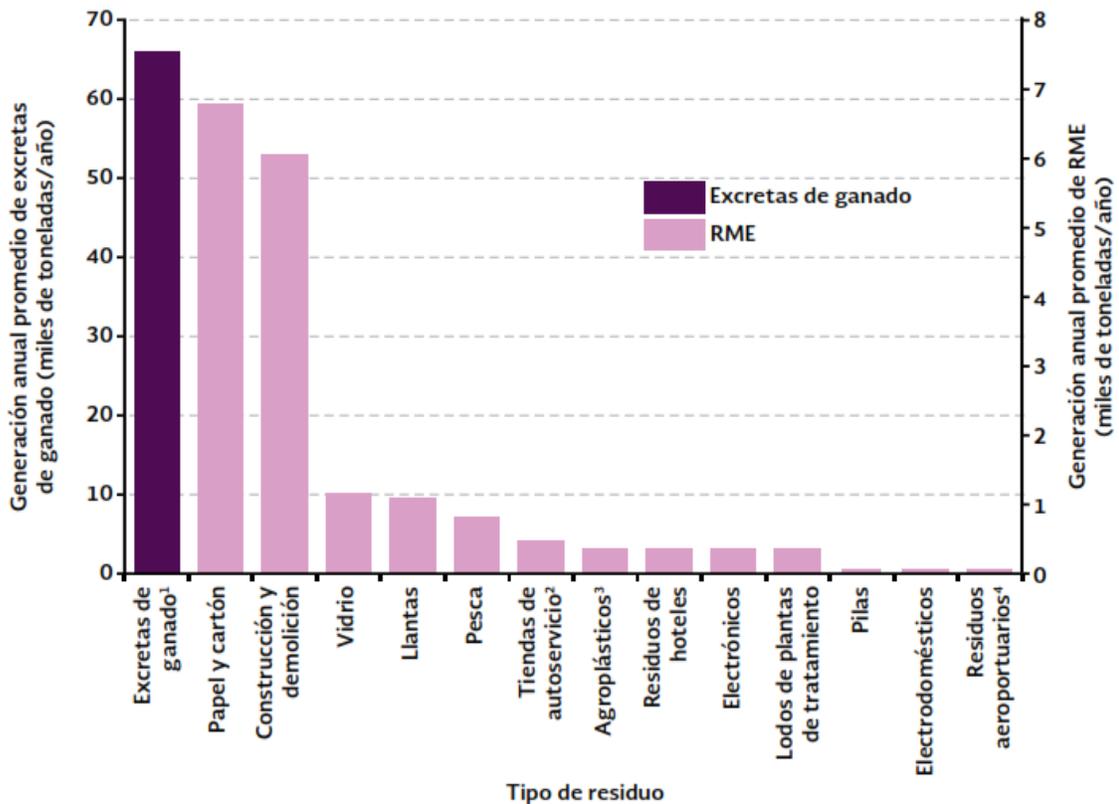


Figura 1.6 Gráfica de la generación anual promedio de RME en México

De acuerdo a lo anterior las excretas de ganado bovino están consideradas dentro de la categoría de RME. En base al Informe de la Situación del Medio Ambiente en

México durante el periodo 2006-2012, los volúmenes más altos de RME correspondieron a las excretas de ganado porcino y bovino lechero con un total de 66.7 millones de toneladas, como se observa en la Figura 1.6. Dichos datos generan un gran impacto ambiental que puede dividirse en tres categorías, la relacionada con la acumulación de nutrientes en suelos, la eutrofización del agua y las emisiones de gases de efecto invernadero así como malos olores en el aire (SEMARNAT, 2012).

1.4.2. Características y propiedades de las excretas bovinas

Las características y propiedades difieren en cada sistema de producción del sector ganadero, debido a que 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. Algunos autores han caracterizado fisicoquímicamente estos desechos, en la Tabla 1.5 se muestran los valores reportados en sus investigaciones (Luis-Garcez, 2015).

Tabla 1.5 Caracterización de excretas bovinas

| Parámetro | Nasir et al., 2013 | Aragaw et al., 2013 | Lobato-Fuertes, 2012 |
|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| pH | 7.25 | 7.19 | 8.43 |
| Sólidos Totales | 189.8 mg/L | 15.42 % | 233.7 g/L |
| Sólidos Volátiles | 34 mg/L | 12.68 % | 174.5 g/L |
| DQO | 24.85 mg/L | -- | 133.5 g/L |
| NH ₃ -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 una disposición final incorrecta produciría elevados índices de contaminación. Sin embargo las propiedades que estos desechos presentan, pueden aprovecharse de múltiples maneras y con ello minimizar su impacto ambiental (Luis-Garcez, 2015).

1.4.3. Usos actuales de las excretas bovinas

Actualmente se han creado estrategias para el manejo de excretas, como el compostaje que aumenta el aprovechamiento en la fertilización de cultivos y disminuye la viabilidad de semillas de maleza presentes en el estiércol y eliminan huevecillos de plagas (Ruvalcaba et al., 2012).

Otra alternativa para el manejo y aprovechamiento de excretas, es el uso de biodigestores que consiste en conservar la excreta en depósitos cerrados que favorecen el crecimiento de bacterias anaerobias metanogénicas que promueven la descomposición y fermentación para la producción de gas combustible y un efluente rico en nutrientes y materia orgánica (Ruvalcaba et al., 2012).

1.5. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (por ejemplo H_2O_2). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica, es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles (FAO, 2011).

Sin embargo a pesar de presentar diversas ventajas, la digestión anaerobia puede ser inhibida por diversos 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.

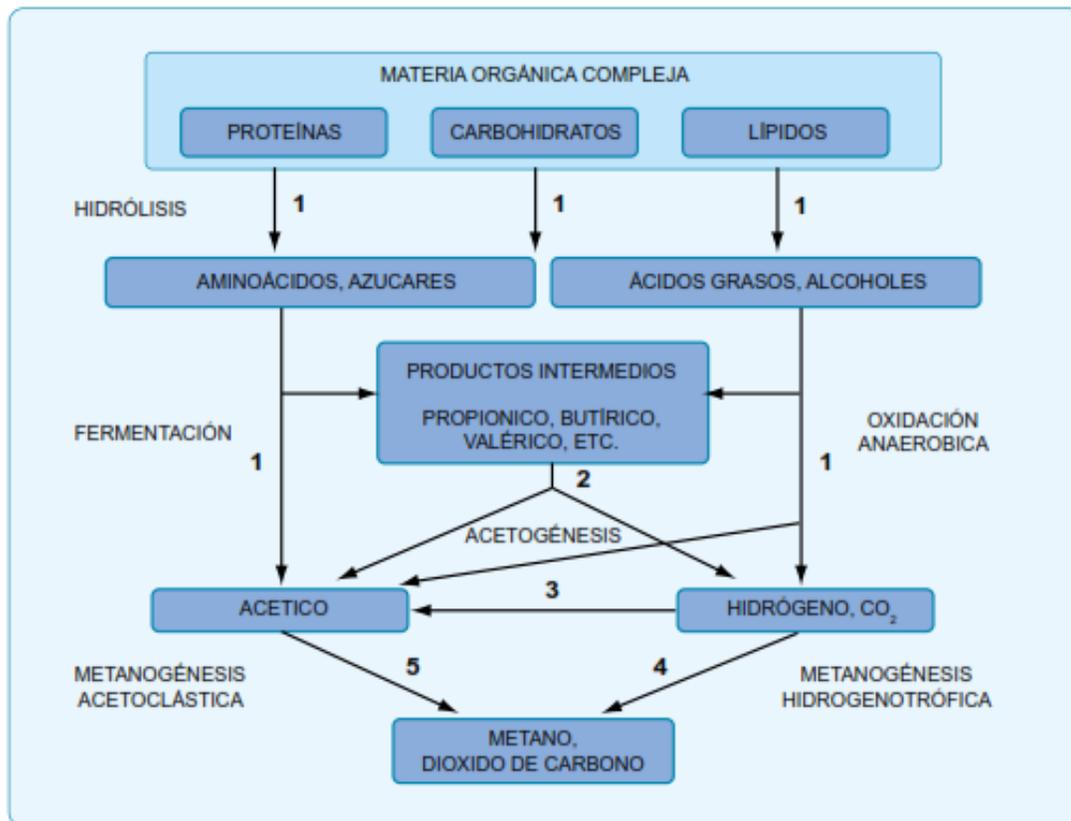
- El pH: La conversión óptima de sustratos orgánicos en ambientes anaeróbicos ocurre a valores de pH neutros.
- La agitación: Para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o agregados de bacterias, es decir mejorar su contacto.
- El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): El influente debe 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.

Un factor importante que afecta la digestión de los residuos sólidos citrícolas es la presencia de aceites esenciales, los cuales actúan como inhibidores del crecimiento bacteriano, es por ello que la extracción de estos aceites mejoran las condiciones en que se encuentran los microorganismos anaerobios (Luis-Garcez, 2015).

1.5.1. Etapas de la digestión anaerobia

El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica se divide en cuatro fases o etapas, como podemos observar en la Figura 1.7.

- 1. Hidrólisis:** Es la primera etapa en la que se realiza la ruptura y solubilización del material orgánico complejo a sustratos solubles. 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 proteasas, péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos (FAO, 2011).



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: (1) bacterias fermentativas; (2) bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; (3) bacterias homoacetogénicas; (4) bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; (5) bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1.7 Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos

2. **Etapa fermentativa o acidogénica:** En esta etapa los compuestos generados en la etapa anterior son fermentados a través de las bacterias acidogénicas, las cuales degradan los azúcares solubles, aminoácidos y ácidos grasos en compuestos solubles más simples, dando como resultado la formación a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono y otros productos intermedios (Roa-Rosas, 2016).
3. **Etapa acetogénica:** En esta etapa se realiza la degradación de los ácidos orgánicos superiores a acetato. Los organismos oxidantes del ácido orgánico transforman los ácidos grasos de cadena corta en ácido acético, hidrogeno y

dióxido de carbono que posteriormente pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas (Roa-Rosas, 2016).

- 4. Etapa metanogénica:** En esta última etapa se produce la remoción de la materia orgánica y la recuperación de energía en forma de metano. 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 acetoclásticas) 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 (Luis-Garcez, 2015).

1.5.2. Reactores de digestión anaerobia

Un reactor es un dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales como concreto hasta acero inoxidable (FAO, 2011).

A continuación se mencionarán los tipos de digestores o reactores anaerobios más utilizados hasta el momento en el campo de la investigación:

- **Reactor continuo de tanque agitado (CSTR, por sus siglas en inglés).** Este tipo de reactor se usa comúnmente en procesos industriales. También es llamado reactor de retromezcla (backmix), y se emplea sobre todo para reacciones en fase líquida. Normalmente se opera en estado estacionario y se asume que produce una mezcla perfecta. No hay dependencia del tiempo o de la posición en la temperatura, la concentración o de la velocidad de reacción dentro del CSTR. Es decir, todas las variables son iguales en todos los puntos del interior del reactor (Scott-Fogler, 2008).

- **Reactor tubular.** Este reactor consta de un tubo cilíndrico y normalmente opera en estado estacionario, igual que el CSTR. Los reactores tubulares se emplean con mayor frecuencia para las reacciones en fase gas. Así mismo los materiales que reaccionan se consumen de manera continua a medida que fluyen a lo largo del reactor. Al modelar el reactor tubular se asume que la concentración varía continuamente en la dirección axial a todo lo largo del reactor (Scott-Fogler, 2008).

- **Reactor de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés).** Los reactores anaerobios de flujo ascendente se utilizan para el tratamiento de aguas residuales concentradas (industriales, agropecuarias, entre otros). En el UASB, el agua residual a tratar es conducida desde la parte superior del reactor (tanque) hacia el fondo del mismo por medio de un sistema de tuberías. El afluente fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos (microorganismos anaerobios) llevándose a cabo de esta forma el tratamiento del agua residual (CONAGUA, 2016).

- **Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI).** Los reactores de lecho fluidizado inverso ofrecen varias ventajas operativas, tales como un flujo gas-sólido uniforme con mucho menor agregado de sólidos, menor dispersión axial y periodos de residencias más cortos. Estos reactores utilizan partículas de

soporte con una densidad específica más baja que la del líquido, estas partículas son fluidizadas hacia abajo (Domínguez-Hernández, 2016).

- **Reactor tipo Batch.** En este tipo de reactor la alimentación o carga del digestor con la materia prima, sólida, seca, se realiza por lotes (discontinuos) y la carga de los residuos estabilizados se efectúa una vez que ha finalizado la producción de biogás. Este sistema discontinuo es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materias primas que presentan problemas de manejo en un sistema semicontinuo y continuo, o materiales difíciles de digerir metanogénicamente o cuando las materias primas a procesar, están disponibles en forma intermitente (FAO, 2011).

1.6. Inóculo

Un inóculo se define como un consorcio de diversas especies microbianas, como las que se encuentran en los lodos aerobios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, o puede ser un cultivo de microorganismos especializados con afinidad por un compuesto, los cuales pueden conseguirse comercialmente o en los laboratorios de centros de investigación en contaminantes. Aunque el riesgo para la salud es mínimo, el uso de estos lodos debe realizarse bajo controles adecuados de operación, debido a la posible presencia de patógenos (Mora et al., 2005).

La digestión anaerobia es influenciada por diferentes factores, en donde la relación inóculo-sustrato es un factor clave para la optimización del proceso. A pesar de que en la literatura se mencionan diferentes calores recomendables, estos oscilan dependiendo de las características del sustrato y del inóculo, además del tipo de unidades usadas para su determinación (Parra et al., 2015).

Para la inoculación, es necesario emplear un cultivo bacteriano viable que contenga un amplio espectro de microorganismos, ya que el inóculo se reproduce hasta

alcanzar una población microbiana lo suficientemente importante como para poner en óptimo funcionamiento el proceso de arranque del reactor (Pérez et al., 1997). Es por ello que la inoculación consiste en agregar microorganismos degradadores (inóculo), provenientes de un tratamiento anaerobio estabilizado, al sustrato contenido en el digestor. Estos microorganismos se mantienen en un ambiente controlado (biológico, químico y físico) que les permite ajustarse al tipo de sustrato empleado y alcanzar un estado de equilibrio (Nakasima et al., 2017).

Para un reactor el tiempo de arranque diferirá si el lodo utilizado como inóculo tiene una alta actividad metanogénica y se adapta a los sustratos presentes. En países donde la tecnología anaerobia es ampliamente utilizada (Europa, USA, China) la obtención de lodos como inóculos para las plantas de tratamiento normalmente se realizan a partir de otros reactores o estos son suministrados por compañías privadas; sin embargo, en los países de América Latina que han venido utilizando esta tecnología, la obtención de lodos como inóculos no es una labor fácil, ya que no existen suficientes reactores anaerobias que suministren inóculos de calidad. En la Tabla 1.6 se muestra diferentes fuentes de inóculos (Díaz et al., 2002).

Tabla 1.6 Diferentes fuentes de inóculos para reactores anaerobios

| Tipo de inóculo | Actividad metanogénica específica (gCH ₄ -DQO/g SSV*d) | Concentración típica de SSV en el lodo (g/L) |
|----------------------------|---|--|
| Lodo granular | 0.5 – 1.5 | 70 – 120 |
| Biopelícula | 0.4 – 1.2 | ND |
| Lodos domésticos digeridos | 0.02 – 0.2 | 15 – 40 |
| Estiércol digerido | 0.02 – 0.08 | 20 – 80 |
| Lodo de fosa séptica | 0.01 – 0.07 | 10 – 50 |
| Laguna anaerobia | 0.03 | 30 |
| Estiércol fresco | 0.001 – 0.002 | 30 – 140 |
| Sedimento laguna | 0.002 – 0.005 | 20 – 50 |

El éxito o fracaso de un sistema anaerobio depende fundamentalmente de la calidad de la biomasa contenida en el reactor; por lo tanto, la caracterización de la biomasa permite entender el funcionamiento del sistema, proyectar su desempeño futuro y definir la potencialidad de la biomasa como fuente de inóculo para otros reactores (Díaz et al., 2002).

1.7. Pretratamiento térmico

El pretratamiento térmico permite la solubilización de la materia orgánica y facilita la fase de hidrólisis, que es la tasa de limitación de paso cuando la degradación de residuos sólidos orgánicos tienen un alto contenido de compuestos complejos (Coelho et al., 2011).

En teoría, el pretratamiento térmico no solo puede mejorar la hidrólisis de partículas de lodo y sustancias orgánicas macromoleculares, sino también disminuye la viscosidad de alto contenido de sólidos de lodos, por lo que este se vuelve más fluido cuando su temperatura aumenta (Farno et al., 2014).

Hasta hace poco, la mayor parte de las investigaciones sobre el pretratamiento térmico de lodos se lleva a cabo en un alto rango de temperatura y es acompañado de altas presiones. Sin embargo, este tipo de tratamiento implica enormes consumos de energía, impone exigencias estrictas en los dispositivos e incurre en costos altos que compensan en gran medida el beneficio general de este método (Appels et al., 2010). Es por ello que con el fin de superar estos inconvenientes, el pretratamiento térmico a baja temperatura (50-90 °C) ha ganado la atención en los últimos años. Al igual que el tratamiento a temperaturas más altas, el pretratamiento térmico a 50-90 °C puede disolver sustancias orgánicas en sólidos del lodo y descompone los lípidos en ácidos grasos volátiles (Ferrer et al., 2008).

Algunos de los autores que han propuesto el pretratamiento térmico a bajas temperaturas son:

- Liao et al., (2016). Investigaron el efecto del pretratamiento térmico a bajas temperaturas, si podría acelerar la digestión anaerobia de lodos de alto contenido de sólidos, los resultados mostraron que el pretratamiento térmico a 70 °C durante 30 minutos era óptimo. Debido a que acelera la etapa de hidrólisis, también se reduce la viscosidad de lodo tratado térmicamente, la producción de biogás se puede aumentar más de un 10 %, y el tiempo de digestión se puede acortar de manera significativa.

- Nazari et al., (2017). Estudio la relación entre el grado de solubilización y biodegradabilidad de los lodos de aguas residuales en la digestión anaerobia como resultado del pretratamiento térmico a baja temperatura. Se estudiaron utilizando diversos tipos de lodos incluyendo condiciones experimentales como la temperatura, tiempo de reacción y el pH. Obteniendo las condiciones de funcionamiento óptimas para la máxima solubilización de DQO en 80 °C, 5 h y pH \approx 10, la solubilización de DQO en estas condiciones aumentó en un 20 % con una reducción de SV del 44 % en comparación con la muestra no tratada.

- Hernández-Vásquez et al., (2017). Propusieron un tratamiento térmico, que permitirá la solubilización de la materia orgánica, logrando inactivar patógenos y aumentar la producción de biogás. El tratamiento térmico se llevó a cabo a 3 diferentes temperaturas (70, 80 y 90 °C) y 3 diferentes tiempos de exposición (1, 1.5 y 2 horas), para evaluar la inactivación de microorganismos patógenos. En donde observo que una vez que el inóculo fue pretratado térmicamente y a medida que se fue aumentando la temperatura y el tiempo de exposición, beneficio significativamente la solubilización de la materia orgánica reflejándose en un aumento de sólidos totales (ST) con un 2.2 % m/m a 90 °C

y 2 h. de exposición y en los sólidos volátiles con un 70.72 %m/m respectivamente. Por lo cual concluye que los tratamientos a 70 y 80 °C lograron una disminución significativa de coliformes fecales y salmonella spp. Así mismo el tratamiento de 90 °C logró eliminar por completo los microorganismos patógenos demostrando que el pretratamiento térmico a bajos rangos de temperatura es favorable para solubilizar la materia orgánica, beneficiando la etapa de hidrólisis de manera considerable, además de lograr la inactivación de patógenos, por lo que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo satisfactoriamente.

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 presenta un diagrama de bloques con la metodología general que se realizó.

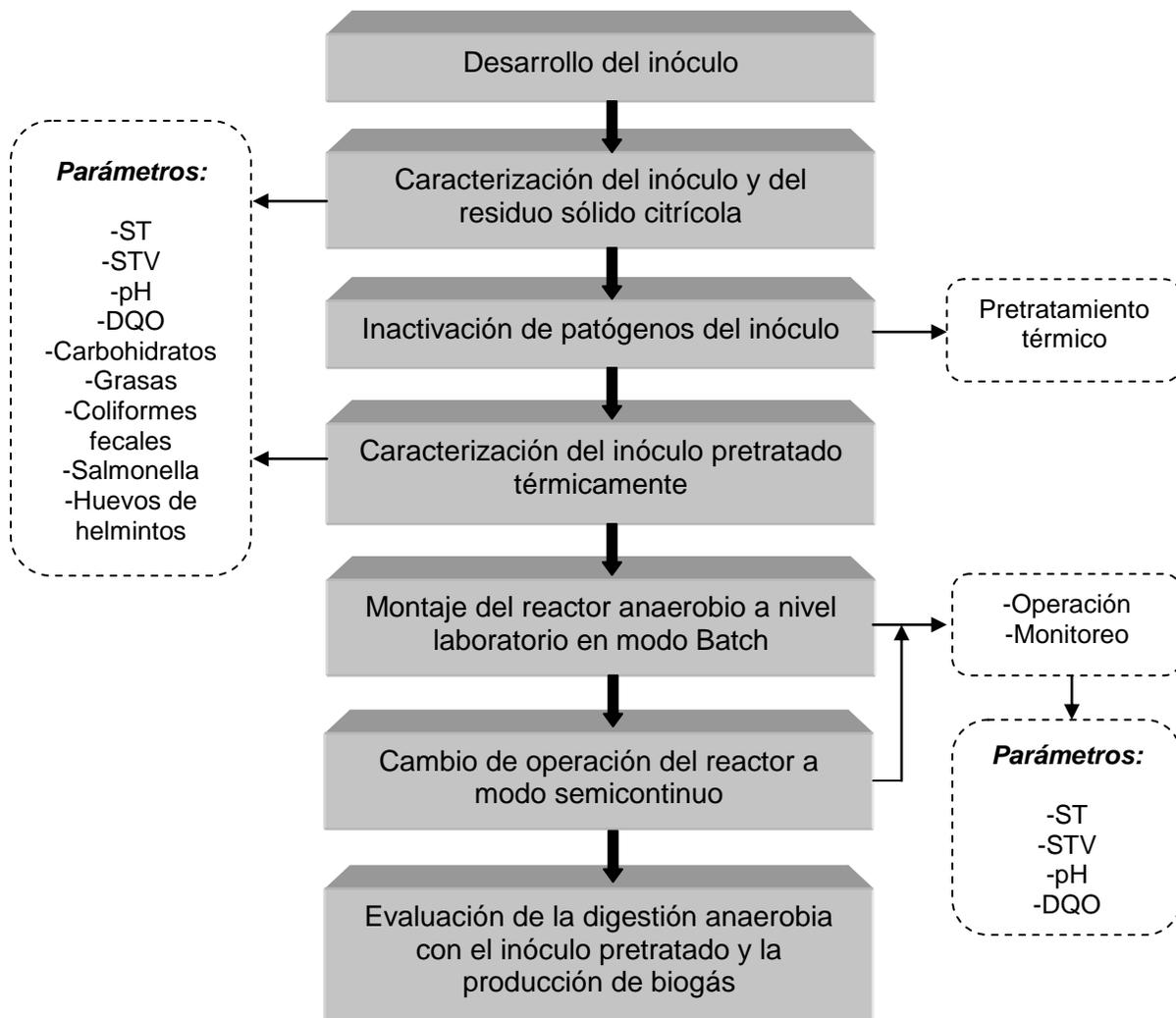


Figura 2.1 Etapas de la metodología general para esta investigación

2.1. Características del digester anaerobio

El digester anaerobio se encuentra ubicado dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba, en la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, el cual trabaja con excretas de ganado bovino. En la Figura 2.2 se muestra el digester.



Figura 2.2 Digestor anaerobio

El digester está fabricado en fibra de vidrio con un $\frac{1}{4}$ " 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. En la Tabla 2.1 se muestran las características generales del digester anaerobio (Romero-Figueiras, 2013).

Tabla 2.1 Características del Digestor Anaerobio (DA)

| Especificaciones | Valor | Unidad |
|---|-----------------|----------------------|
| Material de fabricación | Fibra de vidrio | --- |
| Espesor | 0.00635 | m |
| Sección 1. Cuerpo del reactor | | |
| Diámetro interno del tanque | 0.56 | m |
| Altura del tanque | 1.0 | m |
| Volumen total del tanque | 0.246 | m ³ |
| Sección 2. Fondo cónico del reactor | | |
| Diámetro interno | 0.56 | m |
| Altura del cono | 0.042 | m |
| Volumen total | 0.004 | m ³ |
| Sección 3. Chaqueta de calentamiento | | |
| Diámetro | 0.59 | m |
| Anuló | 0.025 | m |
| Altura | 0.76 | m |
| Volumen total | 0.02 | m ³ |
| Volumen total del digestor | 0.25 | m³ |

2.2. Desarrollo del inóculo

Las excretas bovinas fueron obtenidas de un rancho ganadero ubicado en Orizaba, Veracruz, las cuales se trasladaron hasta el Tecnológico de Orizaba para la alimentación del digestor anaerobio.

Fueron necesarios 30 Kg en total de excretas bovinas diluidas con agua para la formación del Inóculo, mediante la relación 1:3, como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Dilución de las excretas bovinas

Una vez diluida la muestra se procedió a filtrar la dilución para separar las porciones de alimento (bagazo) y basura que se encontraran en las excretas, con el fin de no obstruir las mangueras de recirculación del digestor.

Posteriormente se alimentó con los 120 L de excretas bovinas previamente diluidas y finalmente el digestor anaerobio se mantuvo operando en modo batch durante 28 días. En la Figura 2.4 se observa el método de filtrado, alimentación y muestreo.



Figura 2.4 Obtención del inóculo

2.3. Obtención del residuo sólido orgánico cítrico

Los Residuos Sólidos Orgánicos Cítricos (RSOC) 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. Una vez recolectados los RSOC se realizó la preparación con las cáscaras, semillas y membranas de la naranja, con el propósito de obtener un sustrato semejante al procedente de la industria cítrica de acuerdo a lo presentado por Luis-Garcez (2015).

Sin embargo debido a sus características sólidas, dichos residuos fueron reducidos a un tamaño adecuado para su posterior trituración con agua destilada mediante una licuadora convencional como se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Obtención del RSOC

2.4. Inactivación de patógenos del inóculo

Para la inactivación de patógenos del inóculo se tomaron muestras del digester anaerobio y se colocaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL para posteriormente llevarlos a un sistema de calentamiento denominado “Baño termostático con controlador de temperatura”.

En la Figura 2.6 se presenta la metodología que se empleó para la inactivación de los microorganismos patógenos y en la Figura 2.7 se muestra el equipo.

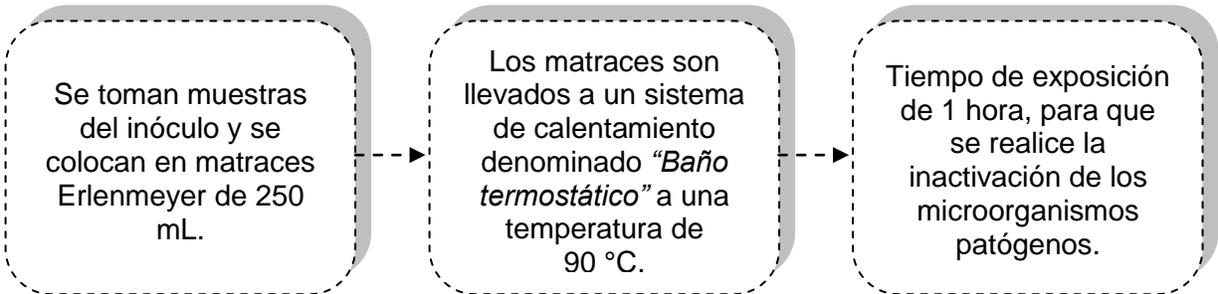


Figura 2.6 Metodología para la inactivación de patógenos



Figura 2.7 Baño termostático

2.5. Caracterización del inóculo, IPT y RSOC

En la Tabla 2.2 se muestran los parámetros que se utilizaron para la caracterización de las muestras. Cabe hacer mención que para la caracterización del inóculo y el Inóculo Pretratado Térmicamente (IPT) se llevaron a cabo pruebas Fisicoquímicas y Microbiológicas y para el RSOC se realizaron únicamente las pruebas Fisicoquímicas.

Tabla 2.2 Parámetros empleados en la caracterización

| Fisicoquímicos | | |
|----------------------------------|-----------------|--|
| Parámetros | Unidades | Método |
| Sólidos Totales (ST) | % | 2540 B S.M. |
| Sólidos Totales Volátiles (STV) | % | 2540 E S.M. |
| pH | -- | Potenciómetro |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | g/L | Micrométodo Colorimétrico 5220 D S.M. |
| Carbohidratos | g/L | Antrona-Sulfúrico Finleyand et al., 1973 |
| Proteínas | % | NMX-AA-026-SCFI-2010 |
| Grasas y Aceites | g/L | NMX-AA-005-SCFI-2013 |
| Microbiológicos | | |
| Coliformes fecales | NMP/g ST | NOM-004-SEMARNAT-2002 |
| Salmonella spp. | NMP/g ST | NOM-004-SEMARNAT-2002 |
| Huevos de helmintos | HH/g ST | NOM-004-SEMARNAT-2002 |

2.6. Análisis y determinación de los parámetros fisicoquímicos

A continuación se describen las determinaciones analíticas realizadas en el Laboratorio de Ambiental 1, el cual se ubica dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba.

2.6.1. Determinación de ST y STV

Se determinaron Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (STV) por el método gravimétrico (2540 B Standard Methods y 2540 E Standard Methods). 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. En la Figura 2.8 se muestran los equipos utilizados.



Figura 2.8 Balanza analítica, estufa y mufla

2.6.2. Determinación de pH

La determinación del pH se realizó con un potenciómetro OAKTON pH 700 como se muestra en la Figura 2.9. El principio básico de la medición 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.



Figura 2.9 Potenciómetro

2.6.3. Determinación de DQO

Se determinó DQO mediante el Micrométodo colorimétrico 5220 Standard Methods. En el cual 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 2.10 se muestran los equipos utilizados en esta determinación.



Figura 2.10 Centrífuga, placa digestora y espectrofotómetro

2.6.4. Determinación de Carbohidratos

El principio de este método se encuentra relacionado con la industria azucarera y en especial con los condensados producidos en los sistemas de evaporación. La determinación colorimétrica de sacarosa con antrona es el método más difundido en la literatura y aplicado en la práctica. El medio ácido hidroliza el enlace glucosídico de la sacarosa y los monosacáridos resultantes reaccionan con la antrona produciendo un color verde-azulado. En la Figura 2.11 se muestran los equipos empleados.



Figura 2.11 Placa de calentamiento y espectrofotómetro

2.6.5. Determinación de Proteínas

Para la determinación de proteínas se utiliza el método Kjeldahl mediante el cual se obtiene el nitrógeno orgánico y los valores obtenidos por este método se multiplican por los factores publicados para una amplia gama de alimentos basados en un análisis detallado de aminoácidos.



Figura 2.12 Equipo Kjeldahl

El método Kjeldahl está basado en la combustión húmeda de la muestra calentándola con ácido sulfúrico concentrado en presencia de catalizadores mecánicos como sulfato de cobre, óxido de mercurio, selenio y óxido de titanio, para efectuar la reducción de nitrógeno orgánico de la muestra de amoníaco, el cual es

retenido en solución como sulfato de amonio, la solución de digestión se hace alcalina y se destila o se arrastra con vapor para liberar el amoniaco que es atrapado y titulado con una solución normal, para obtener el contenido de nitrógeno orgánico de la muestra. En la Figura 2.12 se presenta el equipo utilizado.

2.6.6. Determinación de Grasas y Aceites

El método consiste en acidificar una muestra para extraer las grasas y aceites en solución, la grasa es entonces separada por filtración y extraída con un solvente con ayuda del aparato Soxhlet, posteriormente se evapora el solvente y se cuantifica gravimétricamente el material. En la Figura 2.13 se muestra el equipo empleado.



Figura 2.13 Extractor Soxhlet

2.6.7. Composición de biogás

Para 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 2.14 se muestra el equipo utilizado.



Figura 2.14 Cromatógrafo de gases

2.7. Pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio

Las pruebas de biodegradabilidad anaerobia se realizaron en matraces Erlenmeyer de 500 mL bajo condiciones Mesofílicas y adaptadas a un agitador orbital marca Labline. En la Tabla 2.3, se muestra la mezcla evaluada y el porcentaje utilizado del sustrato (RSOC) y el inóculo.

Tabla 2.3 Mezclas utilizadas en pruebas de biodegradabilidad del IPT

| Mezcla | Composición | Porcentaje (IPT / Sustrato) |
|--------|---------------|-----------------------------|
| C1 | IPT | 100 |
| C2 | IPT + RSOC | 80 / 20 |
| C3 | IPT + RSFV | 80 / 20 |
| C4 | IPT + Glucosa | 80 / 20 |
| C5 | Inóculo | 100 |

En la Figura 2.15 se observan las cinéticas evaluadas sobre el equipo de agitación, los cuales están conectados por mangueras a un dispositivo de desplazamiento de agua para contabilizar el biogás producido. Así mismo el agua que se utilizó para este dispositivo fue ajustada a un pH de 3 a 5 con el propósito de que el CO₂ se mantuviera en su forma libre y este no se disolviera en el agua.

Las pruebas de biodegradabilidad se monitorearon durante 21 días y se evaluó la remoción de materia orgánica y la cantidad de biogás producido, así como su composición mediante cromatografía de gases.



Figura 2.15 Cinéticas evaluadas

2.8. Montaje del reactor anaerobio a nivel laboratorio en modo Batch

En la Figura 2.16 se muestra el reactor anaerobio que se utilizó para el montaje del reactor en modo Batch a nivel laboratorio, el cual consistió en un reactor de vidrio marca SEV con capacidad de 1 L, el cual contó con un motorreductor de corriente directa que proporcionó la agitación al equipo.

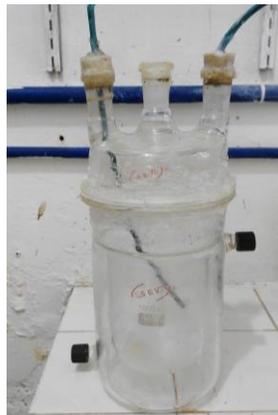


Figura 2.16 Reactor anaerobio

En esta etapa se realizó un arreglo diferente de la mezcla a evaluar, con el propósito de obtener mayores remociones de materia orgánica y con ello una mayor producción de biogás. Por lo cual se determinó que la relación volumen/volumen del inóculo/sustrato (IPT + RSOC) se modificara a un porcentaje de 90/10, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Arreglo del reactor en modo batch

| Lote | Composición | Porcentaje (IPT / Sustrato) |
|------|-------------|-----------------------------|
| 1 | IPT + RSOC | 90 / 10 |
| 2 | | |
| 3 | | |

Para la relación de 90/10 se requirieron 900 mL de IPT y 100 mL de RSOC, así mismo cada lote se operó en modo batch durante periodos de 10 días, evaluando la remoción de materia orgánica, la cantidad de biogás producido y la composición de este. En la Figura 2.17 se muestra el reactor anaerobio montado y conectado por una manguera a un dispositivo de desplazamiento de agua para contabilizar el biogás producido.



Figura 2.17 Reactor anaerobio en modo batch

2.9. Cambio de operación del reactor anaerobio a modo semicontinuo

Con la finalidad de mantener la mayor cantidad de bacterias adaptadas dentro del reactor y que estas no fueran disminuyendo constantemente durante este nuevo periodo de evaluación, se modificó la forma de alimentación.

Los parámetros de monitoreo fueron los mismos que se tomaron en la operación en modo batch, sin embargo, ésta vez los muestreos que se tomaron fueron 2, es decir, la muestra de entrada y de la salida, estableciendo de manera diaria las remociones alcanzadas.

2.9.1. Adaptación de la alimentación

En base a trabajos anteriores y con referencia a los datos obtenidos en la etapa anterior, en donde se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a degradación y producción de biogás cuando la DQO era menor, se optó por una Carga Volumétrica Aplicada (CVA) de 8 g DQO/L*d para verificar si la disminución de materia orgánica mejoraba el desempeño del reactor anaerobio.

Una vez establecida la CVA se calculó el volumen de RSOC a utilizar de acuerdo a la ecuación 2.1

$$C1 * V1 = C2 * V2 \quad (2.1)$$

En donde:

C1 = Concentración de materia orgánica requerida de los RSOC.

V1 = Volumen requerido para alimentar el reactor.

C2 = Concentración de materia orgánica determinada de los RSOC.

V2 = Volumen de RSOC necesarios para alimentar el reactor.

La operación en modo semicontinuo se llevó a cabo durante un periodo de 10 días, en donde se implementaron 3 etapas con diferentes CVA, con el propósito de evaluar la remoción de la materia orgánica, así como la cantidad de biogás producido y su composición. En la Tabla 2.5 se muestra el arreglo de la operación en modo semicontinuo.

Tabla 2.5 Arreglo del reactor en modo semicontinuo

| Etapas | Composición | CVA (g DQO/L*d) |
|--------|-------------|--------------------|
| 1 | IPT + RSOC | 8 |
| 2 | | 10 |
| 3 | | 12 |

2.10. Evaluación de la digestión anaerobia en modo batch y en modo semicontinuo

En esta etapa se realizó la comparación y análisis de los resultados obtenidos de la digestión anaerobia con el IPT y el RSOC, mediante la operación en modo Batch y en modo semicontinuo. Con la finalidad de comprobar que proceso mejora la remoción de la materia orgánica y favorece la producción de biogás.

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. Desarrollo y obtención del inóculo

El inóculo se desarrolló en un digestor anaerobio ubicado dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba, en la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, el cual se alimentó con excretas de ganado bovino y se mantuvo operando en modo batch durante periodos de 28 días.

La recolección de la muestra del inóculo se realizó después de 15 días de operación del digestor anaerobio, en un contenedor de plástico de 20 litros de capacidad aproximadamente, la cual se conservó a una temperatura de 4 °C de acuerdo a la norma NMX-AA-052-1985.

3.2. Obtención del RSOC

Los Residuos Sólidos Orgánicos Citrícolas (RSOC) se obtuvieron de los desechos producidos en diversos locales dedicados a la venta de bebidas cítricas, los cuales se redujeron en tamaño y posteriormente se dejaron reposar durante 48 horas para que los aceites esenciales presentes se colocaran en la superficie de la muestra y así poder retirarlos, con el propósito de minimizar su efecto inhibitor en la digestión anaerobia. Una vez obtenido el RSOC se almacenó en un contenedor de plástico y se conservó a una temperatura de 4 °C de acuerdo a la norma NMX-AA-052-1985.

3.3. Inactivación de patógenos del inóculo

Para la inactivación de los microorganismos patógenos del inóculo, se llevó a cabo un pretratamiento térmico a una temperatura de 90 °C durante 1 hora, mediante un

sistema de calentamiento denominado “Baño termostático con controlador de temperatura”. En la Figura 3.1 se muestra el equipo constituido por una tina de acero inoxidable que posee una resistencia de 1000 W, que se conecta al controlador de temperatura el cual en su interior se encuentra un circuito electrónico y un sistema arduino programado que permite establecer la temperaturas a utilizar.



Figura 3.1 a) Baño termostático y b) Controlador de temperatura

3.4. Caracterización del Inóculo, IPT y RSOC

La caracterización del inóculo, el Inóculo Pretratado Térmicamente (IPT) y el RSOC se realizaron por triplicado. En la Tabla 3.1 se muestra el promedio de los resultados obtenidos, donde se logra apreciar que los RSOC presentan una elevada carga orgánica de ST, STV y DQO con respecto al inóculo y el IPT, esto se debe a que las excretas bovinas pasan por un proceso de separación de sólidos y una dilución de 1:3 antes de alimentar el digester anaerobio, es decir que por cada porción de excreta bovina se agregaron 3 porciones de agua, por lo tanto el inóculo que fue obtenido del interior del digester anaerobio fue prácticamente una solución líquida. Lo cual coincide con los estudios presentados por Luis-Garcez (2015) y Hernández-Vásquez (2018).

Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica del inóculo, IPT y RSOC

| Fisicoquímicos | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|
| Parámetros | Inóculo | IPT | RSOC |
| ST (% m/m) | 2.18 | 3.03 | 8.25 |
| STV (% m/m) | 75.24 | 81.43 | 94.36 |
| pH | 6.94 | 7.23 | 4.02 |
| DQO Total (g/L) | 32.07 | 55.97 | 99.68 |
| DQO Soluble (g/L) | 8.18 | 10.71 | 51.10 |
| Carbohidratos (g/L) | 4.16 | 6.33 | 23 |
| Proteínas (%) | 0.45 | 0.64 | 0.37 |
| Grasas y Aceites (g/L) | 0.98 | 2.10 | 3.42 |
| Microbiológicos | | | |
| Coliformes fecales (NMP/ g ST) | 1.1×10^8 | 300 | --- |
| Salmonella spp. (NMP/ g ST) | 4.6×10^8 | 400 | --- |
| Huevos de helmintos (HH/ g ST) | 16 | 1 | --- |

Respecto al pH se observa que tanto el inóculo como el IPT presentaron un pH cercano y por encima de la neutralidad, lo cual concuerda con los estudios de Aragaw et al., (2013) y Nasir et al., (2013). En cambio los RSOC recolectados presentaron un pH ácido más bajo que los residuos sólidos de la industria cítrica reportados por Koppa et al., (2013) pero más alto que el caracterizado por Martín et al., (2010).

Con base en la Tabla 3.1 se puede apreciar también que a partir del pretratamiento térmico del inóculo todos los parámetros fisicoquímicos presentaron un aumento, debido a que dicho pretratamiento provocó una hidrólisis parcial de los biopolímeros y una disminución en el tamaño de partícula que se manifestó con el incremento de los ST, pH y DQO (Vigueras et al., 2013). Así mismo el aumento en los carbohidratos concuerda con el trabajo de Bougrier et al., (2008) donde reportan que en pretratamientos térmicos menores a 150 °C la solubilización de los carbohidratos es más rápida, debido a que estos se encuentran principalmente en los exopolímeros del lodo los cuales son afectados a bajas temperaturas, por lo cual su solubilización es mayor.

En referencia a los parámetros microbiológicos se observó que después del pretratamiento térmico se eliminaron con éxito los microorganismos patógenos presentes en el inóculo. Lo cual coincide con Martínez-Arce (2009), donde reporta que a temperaturas mayores a 70 °C se logra la eliminación total de coliformes y Salmonella, así como la inactivación efectiva de huevos de helmintos.

3.5. Pruebas de biodegradabilidad anaerobia a nivel laboratorio

En esta etapa se llevó a cabo la evaluación de la biodegradabilidad de 5 diferentes mezclas a escala laboratorio durante 21 días en modo batch, las mezclas tuvieron un volumen 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 3.2 se muestra el comportamiento de los ST para cada una de las 5 cinéticas evaluadas, en donde se puede observar que todas presentan una degradación gradual de ST durante la digestión.

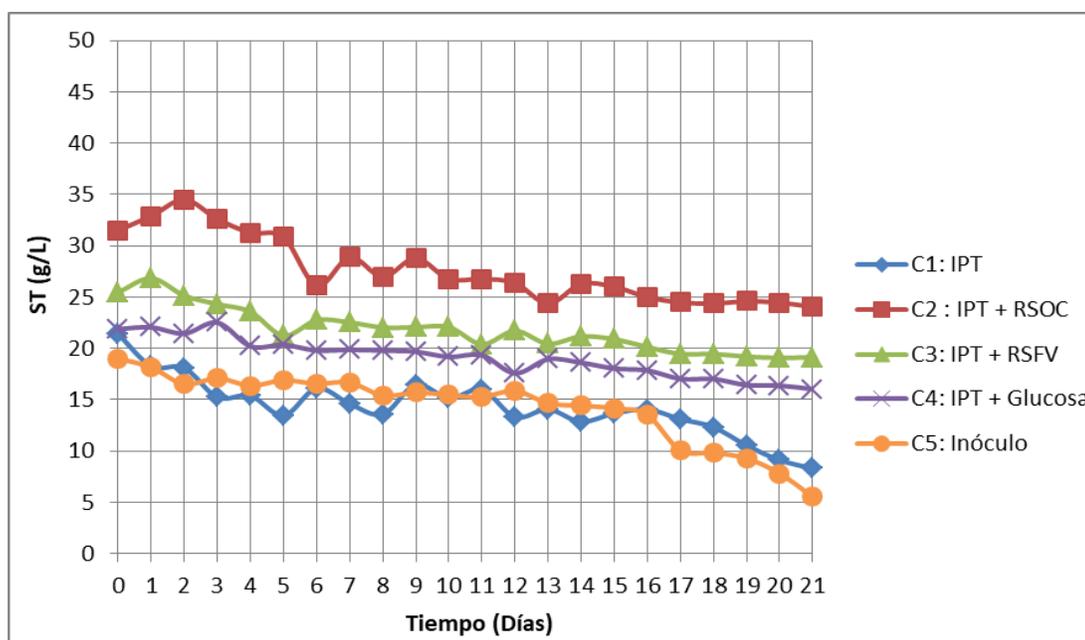


Figura 3.2 Comportamiento de los ST

En la Tabla 3.2 se puede observar que las cinéticas que tuvieron un mayor porcentaje de remoción fueron C1 (IPT) y C5 (Inóculo) las cuales no contenían ninguna mezcla, mientras que las cinéticas C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa) presentaron una menor remoción.

Tabla 3.2 Degradación de los ST en cinéticas de biodegradabilidad

| Mezcla | Composición | ST inicial (g/L) | ST final (g/L) | ST Removida (g/L) | ST Removida (%) |
|--------|---------------|------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| C1 | IPT | 21.39 | 8.28 | 13.11 | 61.28 |
| C2 | IPT + RSOC | 31.51 | 24.37 | 7.14 | 22.65 |
| C3 | IPT + RSFV | 25.47 | 19.14 | 6.33 | 24.85 |
| C4 | IPT + Glucosa | 21.89 | 16.01 | 5.88 | 26.86 |
| C5 | Inóculo | 19.01 | 5.52 | 13.49 | 70.96 |

En la Figura 3.3 se muestra el contenido de STV de cada mezcla, donde podemos apreciar que las cinéticas que presentaron una mayor degradación de STV fueron C1 (IPT) y C5 (Inóculo), estos valores se pueden comprobar mediante los resultados que se muestran en la Tabla 3.3.

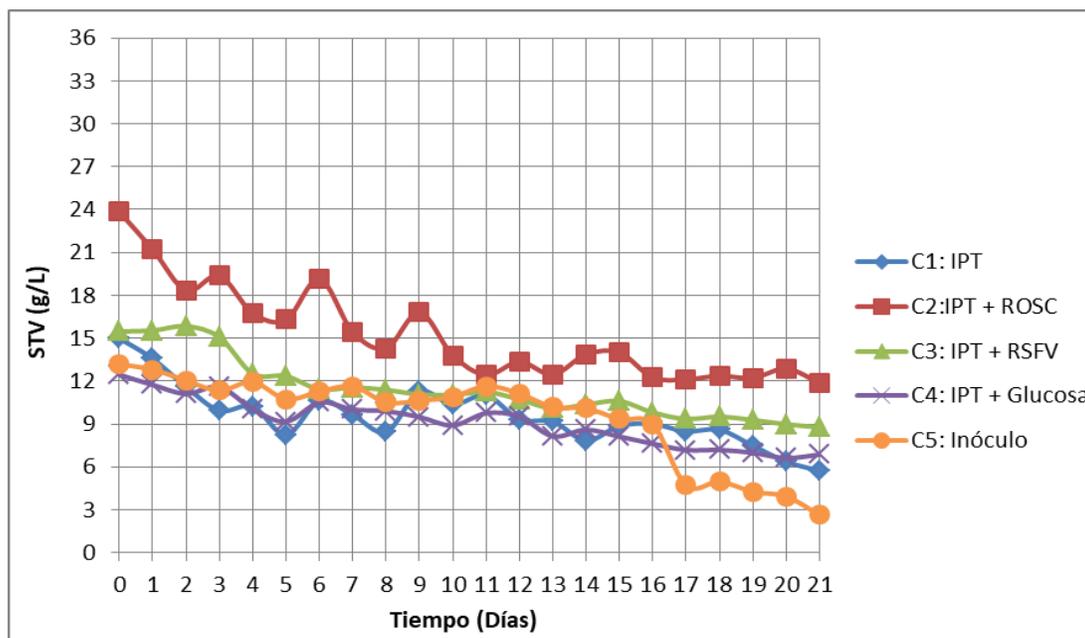


Figura 3.3 Comportamiento de los STV

Así mismo se puede observar en la Figura 3.3 que existe un ligero incremento en el contenido de STV al inicio de los experimentos, pero a medida que transcurre el tiempo se estabiliza, esto es similar a lo presentado por Zahid y Suthar (2017). Ellos evaluaron el efecto de las excretas de vacas como inóculo y como sustrato mezclas de lodos residuales, evaluando la reducción de sólidos volátiles en donde los primeros 10 días se muestra un comportamiento similar al presentado en este trabajo, argumentando que podría atribuirse a diferentes factores como una elevada proporción de componentes inertes (por ejemplo, las paredes celulares bacterianas, fibras, etc.) contenida en los lodos residuales o también podría atribuirse a las características físicas y bioquímicas del sustrato y sus efectos sinérgicos (por ejemplo, en términos de pH, alcalinidad y balance de nutrientes).

Tabla 3.3 Degradación de los STV en cinéticas de biodegradabilidad

| Mezcla | Composición | STV inicial (g/L) | STV final (g/L) | STV Removida (g/L) | STV Removida (%) |
|--------|---------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| C1 | IPT | 14.99 | 5.73 | 9.26 | 61.77 |
| C2 | IPT + RSOC | 20.78 | 12.69 | 8.09 | 38.93 |
| C3 | IPT + RSFV | 15.48 | 8.76 | 6.72 | 43.41 |
| C4 | IPT + Glucosa | 12.44 | 6.46 | 5.98 | 48.07 |
| C5 | Inóculo | 13.18 | 2.63 | 10.55 | 80.04 |

Como se puede observar en las Tablas 3.2 y 3.3 las cinéticas que presentaron un porcentaje mayor al 60% de remoción tanto en ST como en STV fueron las mezclas C1 (IPT) y C5 (Inóculo), mientras que las cinéticas que sufrieron una inhibición en el proceso de digestión fueron las mezclas C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa), las cuales logrando degradar un promedio de 24.78 % para ST y un 43.47 % para STV.

Con referencia a estos datos y con base en nuestro objeto de estudio el cual es la digestión anaerobia del RSOC, podemos decir que dichos datos concuerdan con los

obtenidos por Hernández-Vásquez (2018), el cual realizó pruebas con el IPT y los RSOC mediante una relación volumen/volumen de 90/10, 70/30 y 50/50, en donde obtiene datos de ST y STV muy similares a los que obtuvimos en estas pruebas.

En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento del pH durante los 21 días de operación de cada mezcla. En donde las cinéticas C1 (IPT) y C5 (Inóculo) se mantuvieron en los rangos de neutralidad, presentando un pH promedio de 6.9 y 7.1 respectivamente. Mientras que las mezclas C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa) presentaron un pH menor a 5.5 al inicio del proceso debido a las características inherentes de los sustratos, por lo cual se les realizó un ajuste de pH mediante la aplicación de una solución con bicarbonato de sodio, con la finalidad de neutralizar la muestra hasta obtener un pH aproximado entre 6.8 y 7.2, los cuales son los valores óptimos para llevar a cabo la digestión anaerobia (Kaparaju y Rintala, 2006).

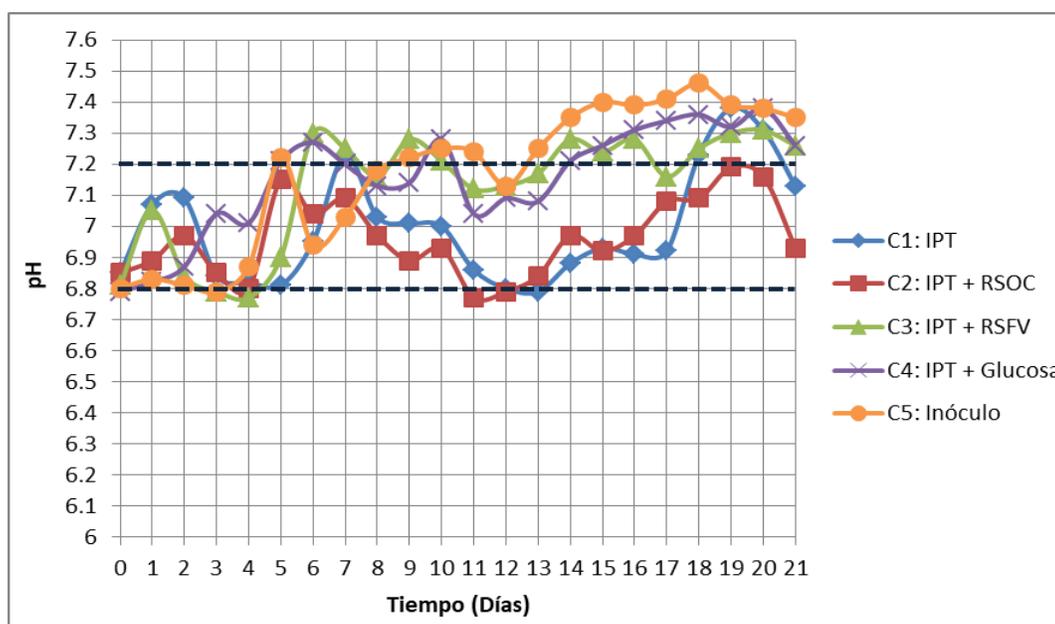


Figura 3.4 Monitoreo del pH

En la Figura 3.5 se pueden observar las curvas de degradación de la DQO de cada mezcla. Donde se logra apreciar que todas las cinéticas presentaron una

degradación gradual de DQO, lo cual se puede comprobar mediante los resultados que se muestran en la Tabla 3.4.

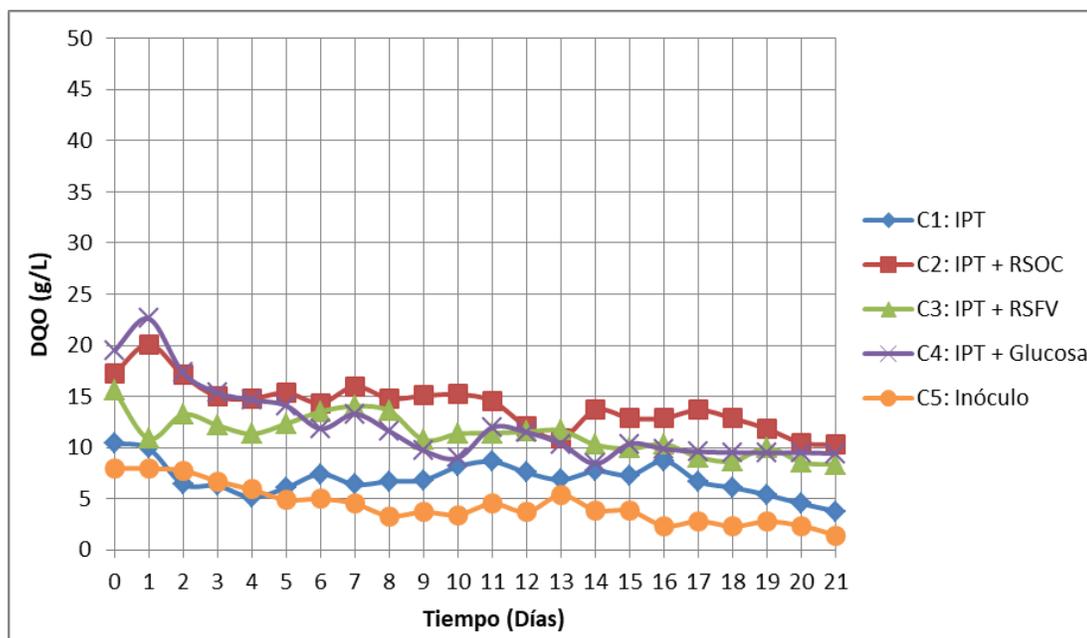


Figura 3.5 Comportamiento de la DQO

Tabla 3.4 Degradación de la DQO en cinéticas de biodegradabilidad

| Mezcla | Composición | DQO inicial (g/L) | DQO final (g/L) | DQO Removida (g/L) | DQO Removida (%) |
|--------|---------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| C1 | IPT | 10.40 | 3.78 | 6.62 | 63.65 |
| C2 | IPT + RSOC | 17.22 | 10.27 | 6.95 | 40.36 |
| C3 | IPT + RSFV | 15.58 | 8.34 | 7.24 | 46.46 |
| C4 | IPT + Glucosa | 19.45 | 9.40 | 10.05 | 51.67 |
| C5 | Inóculo | 7.98 | 1.42 | 6.56 | 82.20 |

Con base en los datos que se presentan en la Tabla 3.4, podemos observar que la mezcla que tuvo una mayor remoción de materia orgánica fue C5 (Inóculo) con un 82 % seguida por la mezcla C1 (IPT) con un porcentaje del 63 %. Mientras que las

mezclas C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa) lograron degradar solo un promedio de 46 % de la materia orgánica presente en las muestras.

En la Figura 3.6 se muestra la producción de biogás durante los 21 días de operación, en donde observamos que la mezcla que presentó la mayor producción de biogás fue la C5 (Inóculo), mientras que las mezclas C1 (IPT), C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa) presentaron volúmenes de biogás por debajo de los 500mL. Lo anterior se atribuye a que posterior al pretratamiento térmico del inóculo las bacterias metanogénicas se inhiben, por lo cual la producción de biogás disminuye.

Esto coincide con lo reportado por Hernández-Vásquez (2018), en donde realizó una reactivación de la actividad metanogénica posterior a un pretratamiento térmico, con la finalidad de que la comunidad bacteriana del inóculo pretratado (Excretas bovinas) no se viera afectada después del pretratamiento térmico.

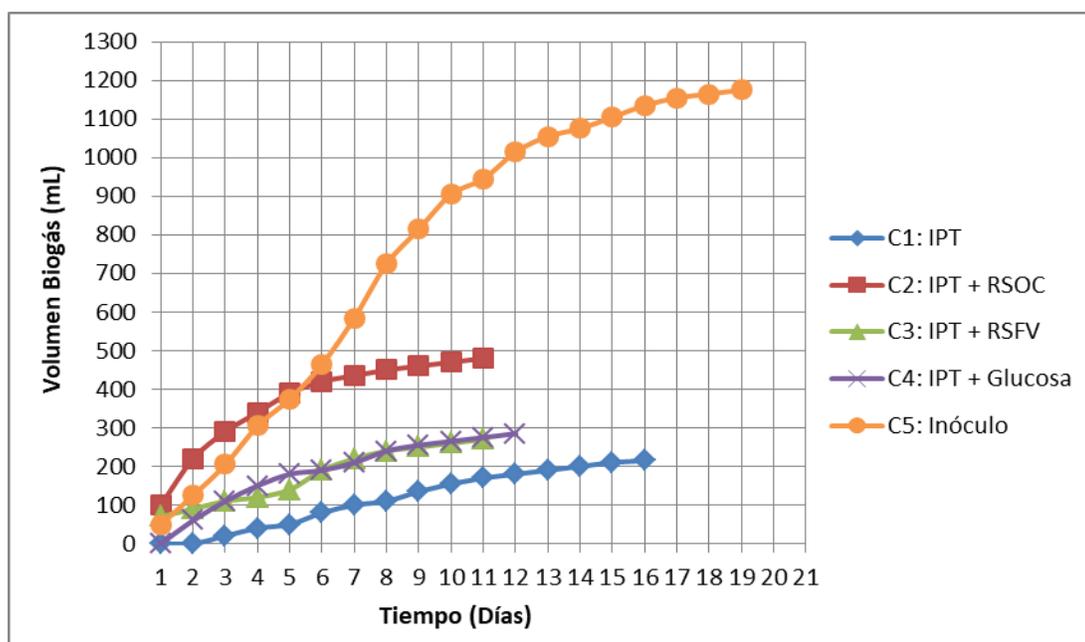


Figura 3.6 Producción de biogás

En la Figura 3.7 se observa el porcentaje de metano determinado mediante cromatografía de gases de las mezclas evaluadas. Donde podemos apreciar que la composición de metano para la mezcla C1 (IPT) osciló entre el 22.7 % y 48 %, la mezcla C2 (IPT+RSOC) osciló entre el 14 % y el 32.1 %, la mezcla C3 (IPT+RSFV) osciló entre el 28 % y el 38 %, la mezcla C4 (IPT+Glucosa) osciló entre el 21.3 % y el 39.4 % y la mezcla C5 (Inóculo) osciló entre el 29 % y el 74.5 %.

Así mismo podemos observar que la producción de metano fue constante solo en la cinética C5 (Inóculo), mientras que en las mezclas C1 (IPT), C2 (IPT+RSOC), C3 (IPT+RSFV) y C4 (IPT+Glucosa) la producción de metano se inició a partir del día 3 y finalizó en el día 13, lo que representa una generación de metano únicamente de 10 días, lo cual se puede atribuir a las características inherentes de cada sustrato.

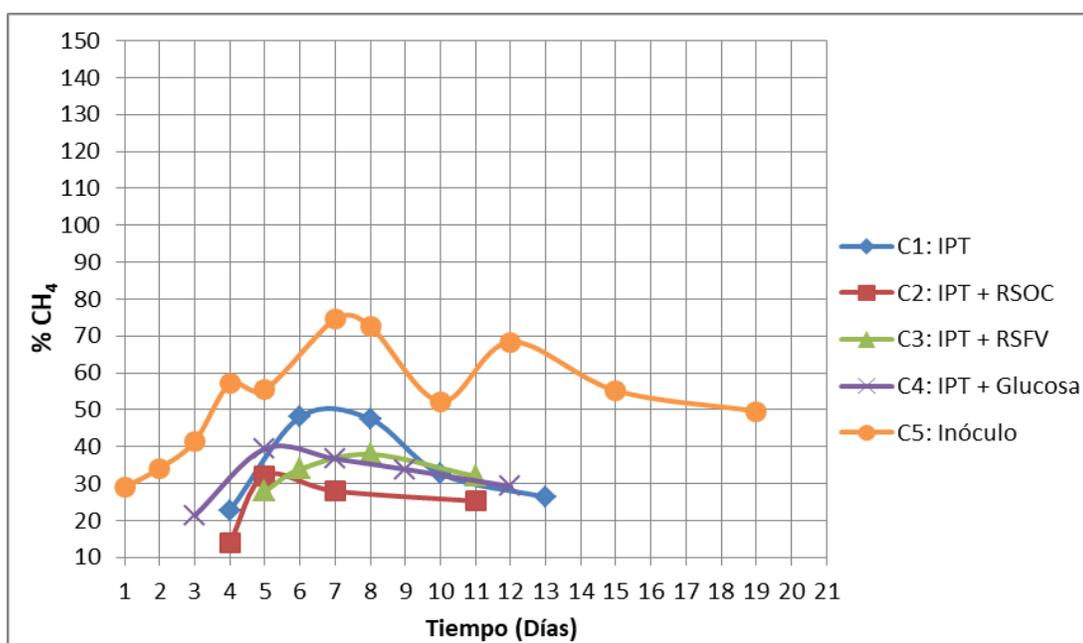


Figura 3.7 Porcentaje de metano

En la Tabla 3.5 se muestran los litros de biogás acumulados y los rendimientos de metano mínimos y máximos alcanzados en cada mezcla. Donde podemos apreciar

que la mezcla que presentó el mayor rendimiento de metano fue C5 (Inóculo), mientras que las demás mezclas oscilaron en un promedio de rendimiento de metano de 0.1988

Tabla 3.5 Producción de biogás y rendimientos de metano

| Mezcla | Composición | Biogás acumulado (L) | y mínimo LCH_4/g DQOrem | y máximo LCH_4/g DQOrem |
|--------|---------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|
| C1 | IPT | 0.215 | 0.0736 | 0.2274 |
| C2 | IPT + RSOC | 0.48 | 0.0666 | 0.1935 |
| C3 | IPT + RSFV | 0.27 | 0.0592 | 0.2728 |
| C4 | IPT + Glucosa | 0.285 | 0.0611 | 0.1015 |
| C5 | Inóculo | 1.175 | 0.2713 | 0.5995 |

3.6. Operación del reactor anaerobio en modo batch

Al término de las pruebas de biodegradabilidad, se procedió a alimentar el reactor anaerobio con el IPT y los RSOC, sin embargo debido a sus características inhibitorias (pH ácido) y con el fin de obtener mayores remociones de materia orgánica y producción de biogás, se decidió que cada lote fuera alimentado con 90 % de IPT y 10 % de RSOC.

El pH fue ajustado al igual que en las pruebas anteriores a un rango de neutralidad con bicarbonato de sodio y se monitoreó cada dos días. En la Figura 3.8 se observa la medición de pH que se realizó a cada lote.

Así mismo podemos apreciar que durante el inicio de cada lote se tuvo que ajustar el pH a valores de entre 6.8 a 7.2, sin embargo posterior al tercer y cuarto día el pH osciló y se mantuvo dentro del rango de neutralidad. Por lo que a pesar de haber sufrido un cambio de pH muy significativo las bacterias lograron restablecerse y no se inhibió el proceso de digestión.

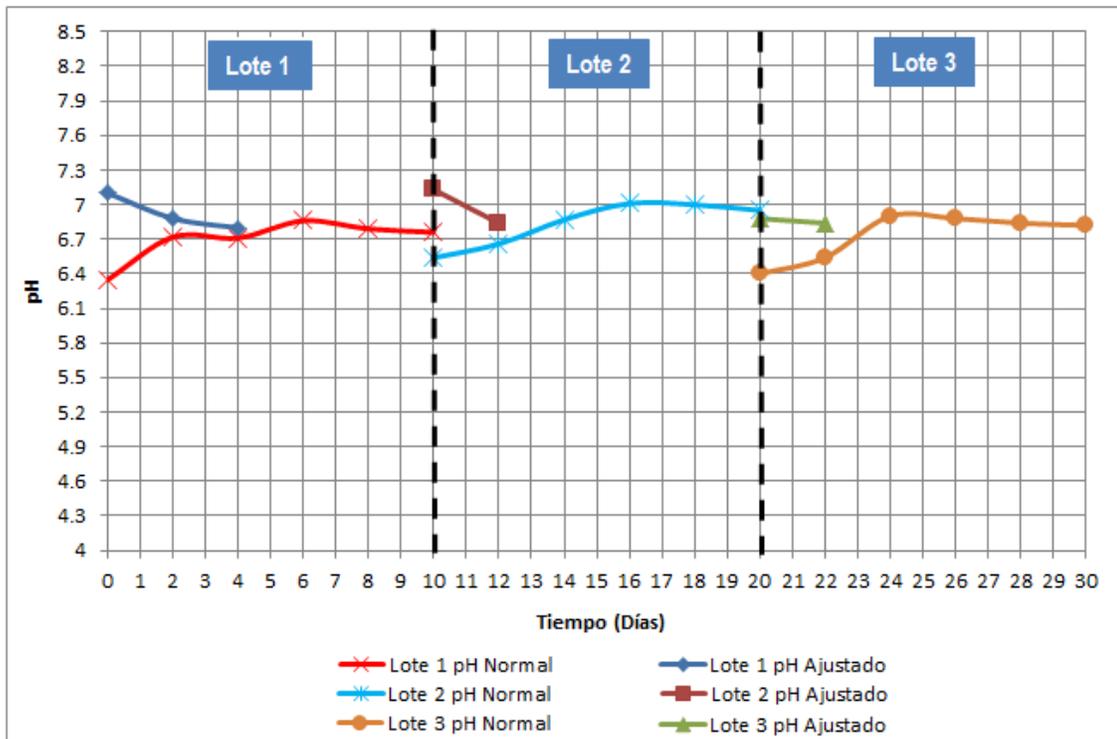


Figura 3.8 Comportamiento del pH

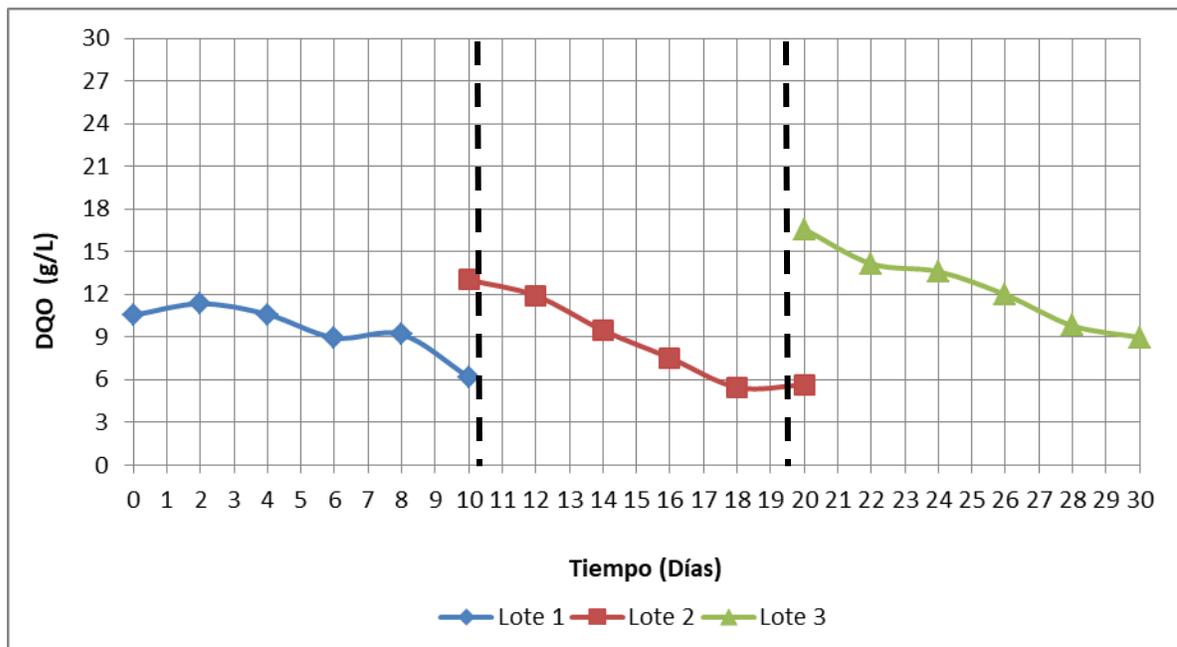


Figura 3.9 Comportamiento de la DQO

En la Figura 3.9 se muestra el comportamiento de la DQO determinada durante los tres lotes, en donde podemos observar que la DQO aumentó en cada lote debido a que cada 10 días se alimentaba con RSOC lo cual agregaba al reactor una mayor cantidad de materia orgánica, sin embargo aún a pesar de la elevada DQO las bacterias presentes en el reactor fueron capaces de adaptarse y degradar este tipo de residuo, logrando remover hasta el 56.75 % de la DQO en el lote 2.

Lo anterior se puede comprobar mediante los resultados que se muestran en la Tabla 3.6, donde se presentan los porcentajes de remoción de cada lote.

Tabla 3.6 Degradación de la DQO

| Lote | DQO inicial (g/L) | DQO final (g/L) | DQO Removida (g/L) | DQO Removida (%) |
|------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| 1 | 10.53 | 6.18 | 4.35 | 41.31 |
| 2 | 13.02 | 5.63 | 7.39 | 56.75 |
| 3 | 16.58 | 8.97 | 7.61 | 45.89 |

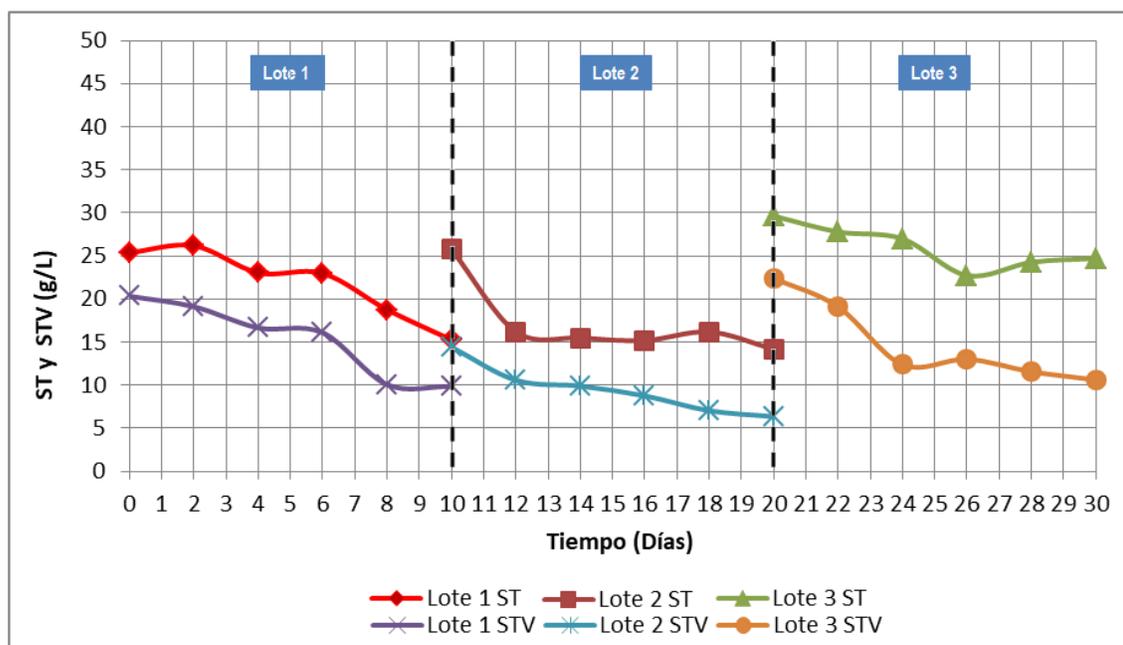


Figura 3.10 Comportamiento de los ST y STV

En la Figura 3.10 se muestra la medición diaria de los ST y los STV contenidos dentro del reactor anaerobio. Donde podemos apreciar que la adición del RSOC produjo una elevación en los sólidos al igual que en la DQO, sin embargo aún a pesar de este aumento las bacterias se adaptaron y comenzaron la degradación de los sólidos de manera constante, logrando alcanzar una remoción hasta del 44.9 % para ST y un 56 % para STV en el lote 2. Lo cual podemos corroborar en la Tabla 3.7, donde se presentan los resultados de los porcentajes de remociones de ST y STV para cada lote.

Tabla 3.7 Remoción de materia orgánica de los ST y STV

| Lote | ST inicial (g/L) | ST final (g/L) | ST Removida (g/L) | ST Removida (%) |
|------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| 1 | 25.37 | 15.24 | 10.13 | 39.9 |
| 2 | 25.75 | 14.17 | 11.58 | 44.97 |
| 3 | 29.63 | 24.71 | 4.92 | 16.6 |
| Lote | STV inicial (g/L) | STV final (g/L) | STV Removida (g/L) | STV Removida (%) |
| 1 | 20.32 | 9.84 | 10.48 | 51.57 |
| 2 | 14.40 | 6.33 | 8.07 | 56 |
| 3 | 22.39 | 10.60 | 11.79 | 52.65 |

En la Figura 3.11 se observa el porcentaje de metano determinado mediante cromatografía de gases en los 3 lotes alimentados con RSOC. Donde podemos observar que la composición de metano fue muy similar para cada lote, oscilando entre el 30 % y el 91 %. Así mismo se puede apreciar que el incremento de metano comenzó entre el tercer y cuarto día de cada lote, y posterior a esos días la producción de metano disminuyó considerablemente.

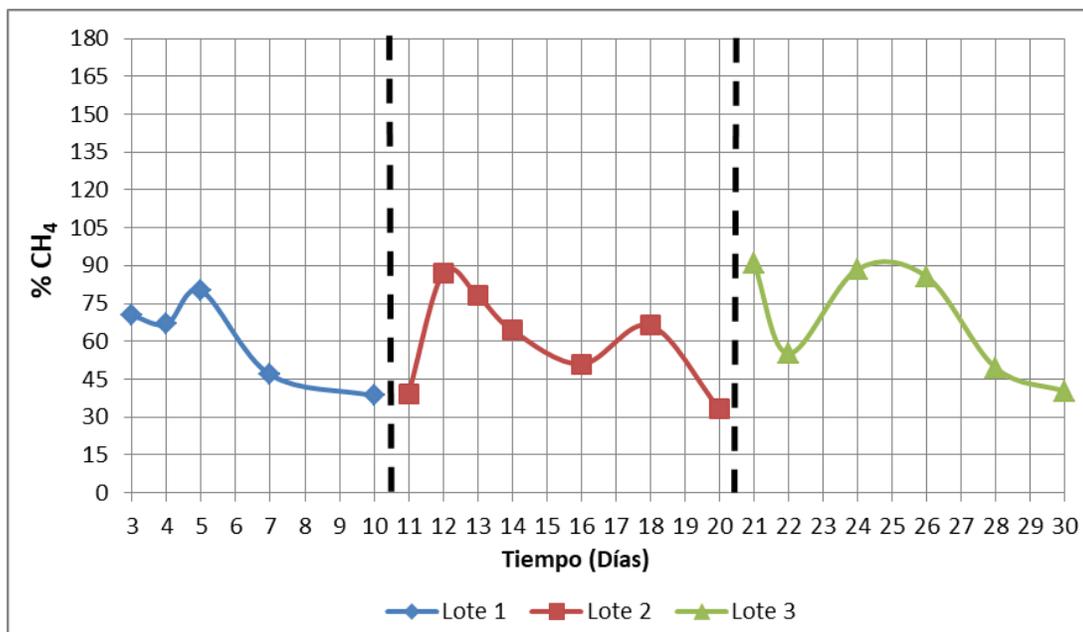


Figura 3.11 Porcentaje de metano en modo batch

En la Tabla 3.8 se muestran los litros de biogás acumulados y los rendimientos de metano mínimos y máximos alcanzados en cada lote. Donde podemos observar que los 3 lotes produjeron cantidades muy similares de biogás que oscilaron en un promedio de 0.541 L.

Tabla 3.8 Producción de biogás y rendimientos de metano en modo batch

| Lote | Biogás acumulado (L) | y mínimo LCH ₄ /g DQOrem | y máximo LCH ₄ /g DQOrem |
|------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 0.535 | 0.8954 | 1.7850 |
| 2 | 0.57 | 0.2597 | 3.0699 |
| 3 | 0.52 | 0.1162 | 1.2267 |

En comparación con los resultados obtenidos en las pruebas de biodegradabilidad podemos decir que el cambio de arreglo que se le realizó a la mezcla (90/10), favoreció en obtener mayores remociones de materia orgánica, logrando un aumento de la producción de biogás, así como un incremento en los rendimientos de metano.

3.7. Cambio de operación del reactor anaerobio a modo semicontinuo

Al término de la etapa anterior y con base en los datos obtenidos en este y otros trabajos de investigación se procedió a realizar el cambio de operación del reactor a modo semicontinuo, con el propósito de comprobar si la disminución de materia orgánica mejoraba el desempeño del reactor.

Por lo cual se establecieron 3 etapas con diferentes CVA, en la etapa 1 se inició con una carga promedio de 8 g DQO/L*d, posteriormente en la etapa 2 se incrementó la carga en un promedio de 10 g DQO/L*d y finalmente la etapa 3 se operó con una carga promedio de 12 g DQO/L*d, durante periodos de 10 días cada uno. Con base en estos datos y de acuerdo al volumen útil del reactor, se calculó mediante la ecuación 2.1 el volumen de RSOC necesarios para alimentar el reactor respecto a cada etapa.

En la Figura 3.12 se puede apreciar los porcentajes de remoción de ST, STV y DQO que se obtuvieron en cada etapa, durante la operación semicontinua del reactor.

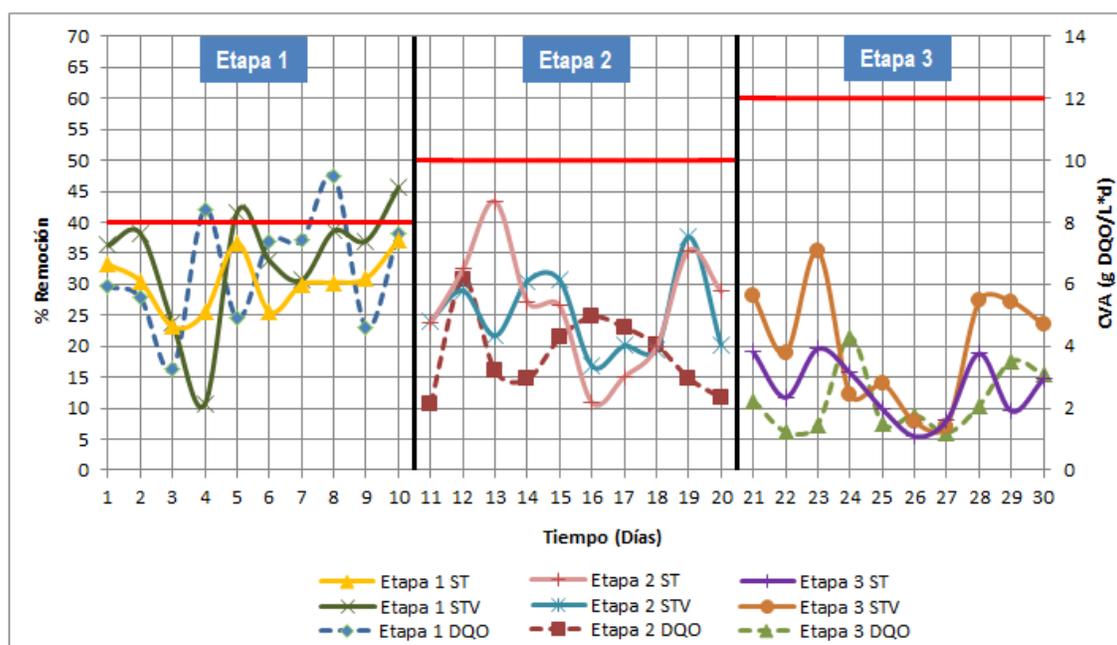


Figura 3.12 Porcentaje de remoción de ST, STV y DQO

Como se puede observar en la Figura 3.12 los porcentajes de remoción para ST, STV y DQO tienen un decremento en lo que respecta a cada una de las etapas de operación, las cuales oscilan entre el 30.2, 26.3 y 13.27 % de ST, 33.6, 25 y 20.1 % de STV y 32.3, 18.7 y 11.2 % de DQO, para las etapas 1, 2 y 3 respectivamente. Dichos valores se pueden comprobar en la Tabla 3.9 en donde se muestran los resultados promedio de las remociones del reactor.

Tabla 3.9 Remoción de materia orgánica de los ST, STV y DQO

| Etapa | ST Rem (g/L) | ST Rem (%) | STV Rem (g/L) | STV Rem (%) | DQO Rem (g/L) | DQO Rem (%) |
|-------|--------------|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| 1 | 9.10 | 30.28 | 5.16 | 33.62 | 2.84 | 32.31 |
| 2 | 8.33 | 26.33 | 3.96 | 25.02 | 1.65 | 18.79 |
| 3 | 3.94 | 13.27 | 3.51 | 20.16 | 0.99 | 11.25 |

En la Tabla 3.9 se observa que los porcentajes de remoción de ST, STV y DQO disminuyen respecto al aumento de la carga orgánica. Lo que representa que a menores cantidades de CVA se obtienen mayores porcentajes de remoción.

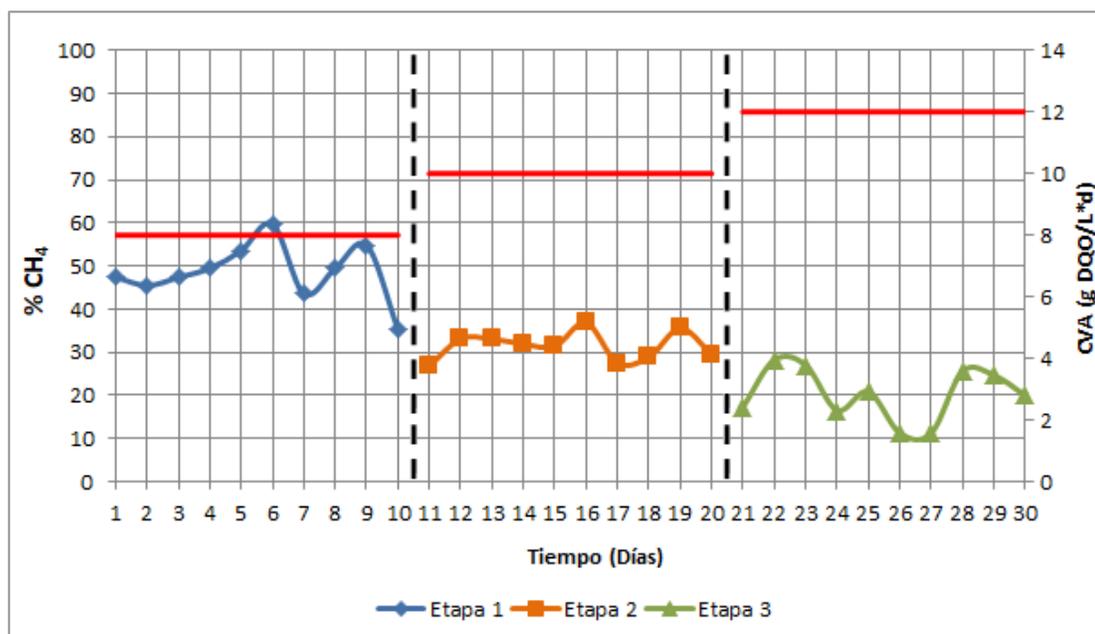


Figura 3.13 Porcentaje de metano en modo semicontinuo

En la Figura 3.13 se muestra el porcentaje de metano determinado mediante cromatografía de gases. En donde podemos observar que la composición de metano fue mayor en la etapa 1 alcanzando un porcentaje de 59 % y posteriormente fue decreciendo a un porcentaje de 35 y 28 % de metano en las etapas 2 y 3 respectivamente.

En la Tabla 3.10 se muestran los litros de biogás acumulados y los rendimientos de metano mínimos y máximos alcanzados en cada etapa. Así mismo se puede apreciar que la etapa 1 presentó la mayor producción de biogás así como los mejores rendimientos de metano, seguido por la etapa 2 y la etapa 1. Con lo cual corroboramos que a una menor carga orgánica en modo semicontinuo mejora el desempeño del reactor anaerobio.

Tabla 3.10 Producción de biogás y rendimientos de metano en modo semicontinuo

| Etapa | Biogás acumulado (L) | y mínimo LCH ₄ /g DQOrem | y máximo LCH ₄ /g DQOrem |
|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 3.53 | 0.5991 | 2.5943 |
| 2 | 2.87 | 0.1284 | 1.0318 |
| 3 | 1.17 | 0.0267 | 0.1359 |

3.8. Evaluación de la digestión anaerobio en modo batch y modo semicontinuo

De acuerdo a los datos obtenidos durante el proceso de digestión anaerobia en modo batch y modo semicontinuo del IPT y el RSOC, se presentan las comparaciones y resultados alcanzados.

En la Tabla 3.11 se muestra la comparación del porcentaje de remoción de los ST y los STV en los dos diferentes modos de alimentación. En donde podemos observar que el proceso en modos batch presenta mayores porcentajes de remoción que los obtenidos en el proceso semicontinuo.

Tabla 3.11 Comparación de la remoción de los ST y STV en modo batch y semicontinuo

| Operación en modo Batch | | | | |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|
| Lote | ST Removida (g/L) | ST Removida (%) | STV Removida (g/L) | STV Removida (%) |
| 1 | 10.12 | 39.90 | 10.48 | 51.56 |
| 2 | 11.58 | 44.96 | 8.06 | 55.99 |
| 3 | 4.91 | 16.59 | 11.78 | 52.61 |
| Operación en modo Semicontinuo | | | | |
| Etapas | ST Removida (g/L) | ST Removida (%) | STV Removida (g/L) | STV Removida (%) |
| 1 | 9.10 | 30.28 | 5.16 | 33.62 |
| 2 | 8.33 | 26.33 | 3.96 | 25.02 |
| 3 | 3.94 | 13.27 | 3.51 | 20.16 |

En la Tabla 3.12 se presenta la comparación de los porcentajes de remoción de la DQO en modo batch y en modo semicontinuo. En donde podemos apreciar que también en este caso el mayor porcentaje de remoción de DQO se presenta en la operación en modo batch, alcanzando hasta un 56.7 % de remoción. Mientras que en el modo semicontinuo se alcanzó solo el 32.3 % de remoción.

Tabla 3.12 Comparación de la remoción de la DQO en modo batch y semicontinuo

| Etapas | Batch | | Semicontinuo | |
|--------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | DQO Removida (g/L) | DQO Removida (%) | DQO Removida (g/L) | DQO Removida (%) |
| 1 | 4.35 | 41.31 | 2.84 | 32.31 |
| 2 | 7.39 | 56.75 | 1.65 | 18.79 |
| 3 | 7.61 | 45.89 | 0.99 | 11.25 |

En la Figura 3.14 se muestran los porcentajes de metano que se obtuvieron durante los procesos de operación en modo batch y en modo semicontinuo. En donde podemos apreciar que existe un mayor porcentaje de metano en el proceso de digestión anaerobia en modo batch.

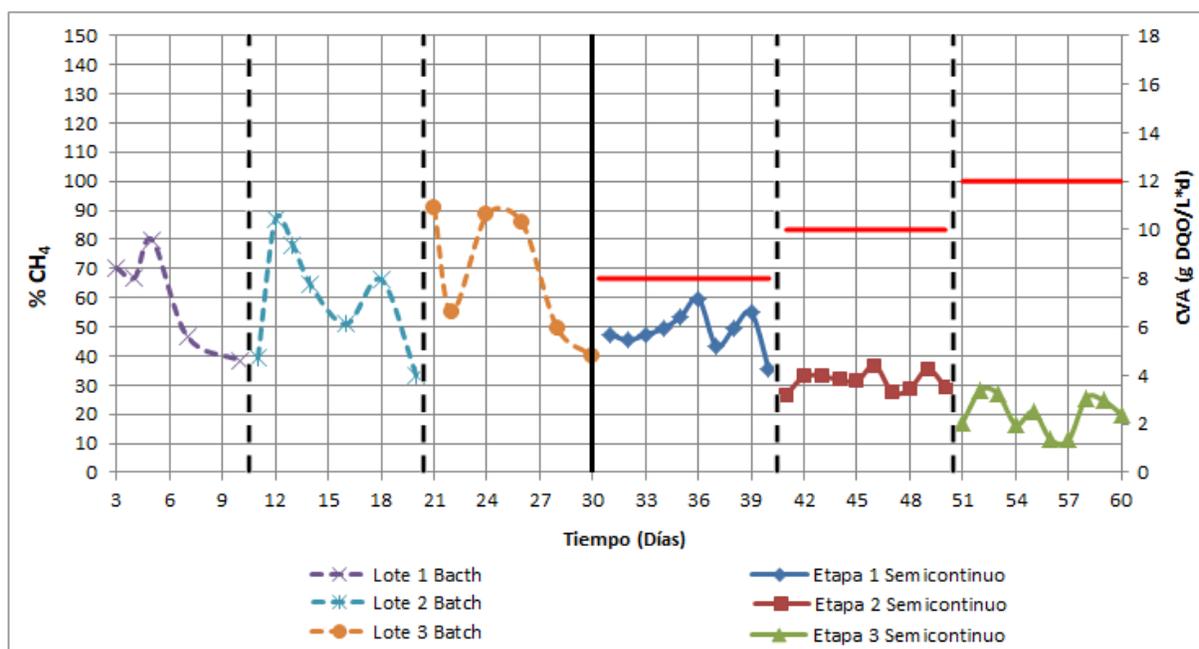


Figura 3.14 Comparación del porcentaje de metano en modo batch y semicontinuo

En la Tabla 3.13 se presentan los litros de biogás acumulados y los rendimientos de metano mínimos y máximos alcanzados en modo batch y en modo semicontinuo. Donde podemos observar que aun a pesar de que en el proceso semicontinuo existió una mayor generación de biogás, este presentó menores rendimientos de metano que los generados en modo batch. Lo cual es similar a lo reportado por Luis-Garcez (2015), en donde indica que posterior al cambio de operación a modo semicontinuo la degradación de la DQO se vio afectada, lo que provocó que disminuyera considerablemente el rendimiento de metano comparado con el proceso en modo batch.

Tabla 3.13 Comparación de la producción de biogás y rendimientos de metano en modo batch y en modo semicontinuo

| Operación en modo Batch | | | |
|--------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Lote | Biogás acumulado (L) | y mínimo LCH ₄ /g DQOrem | y máximo LCH ₄ /g DQOrem |
| 1 | 0.535 | 0.8954 | 1.7850 |
| 2 | 0.57 | 0.2597 | 3.0699 |
| 3 | 0.52 | 0.1162 | 1.2267 |
| Operación en modo Semicontinuo | | | |
| Etapa | Biogás acumulado (L) | y mínimo LCH ₄ /g DQOrem | y máximo LCH ₄ /g DQOrem |
| 1 | 3.53 | 0.5991 | 2.5943 |
| 2 | 2.87 | 0.1284 | 1.0318 |
| 3 | 1.17 | 0.0267 | 0.1359 |

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Con base en las caracterizaciones que se realizaron a los residuos sólidos orgánicos cítricos, se comprobó que presentan una elevada carga orgánica y su pH ácido representa un problema de contaminación si estos no son dispuestos adecuadamente. De igual manera las excretas bovinas muestran características que son contaminantes por su alto contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos.

Una vez que se obtuvo el inóculo y que este fue pretratado térmicamente a 90 °C durante 1 hora, se observó un incremento en los parámetros fisicoquímicos, lo cual se debió a que dicho pretratamiento provocó una hidrólisis parcial de los biopolímeros y una disminución en el tamaño de partícula que se manifestó con el incremento de los ST, STV, pH y DQO, así como Carbohidratos y Grasas.

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con los reportados por la literatura, respecto a que un pretratamiento térmico mejora la hidrólisis de la materia, elimina microorganismos patógenos y reduce la viabilidad de parásitos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de biodegradabilidad se observó que la digestión anaerobia del RSOC con el IPT, es factible, debido a que se alcanzó una remoción de 32.29 % de la DQO. Y así mismo se obtuvo un volumen de biogás de 580 mL durante la experimentación. Lo cual significa que aun a pesar de las características inhibitorias de los RSOC, no representan un obstáculo para la comunidad bacteriana del IPT ya que logra degradar satisfactoriamente la carga orgánica presente.

Para la operación del reactor anaerobio en modo batch, se alimentaron 3 lotes durante un periodo de 10 días cada uno, implementando una relación volumen/volumen de inóculo/sustrato (IPT+RSOC) con un porcentaje 90/10, en

donde obtuvimos porcentajes de remoción de 41.31, 56.75, 45.89 % de DQO, así como valores de rendimiento de metano de 1.7850, 3.0699 y 1.2267 LCH₄/g DOQ_{rem} respectivamente. Por lo que en comparación con los resultados obtenidos en las pruebas de biodegradabilidad podemos decir que el cambio de arreglo que se le realizó a la mezcla (90/10), favoreció en obtener mayores remociones de materia orgánica, logrando un aumento de la producción de biogás, así como incrementando los rendimientos de metano.

Después de la operación en modo batch se cambió la operación a modo semicontinuo en donde se establecieron 3 etapas con diferentes CVA, partiendo de 8, 10 y 12 g DQO/L*d para la etapa 1, 2 y 3 respectivamente, los cuales se operaron por periodos de 10 días cada uno. En donde se lograron obtener porcentajes de remoción de 32.31, 18.78 y 11.25 % de DQO y rendimientos de metano de 2.5943, 1.0318 y 0.1359 LCH₄/g DOQ_{rem} respectivamente.

Con lo anterior se comprobó que los RSOC presentan un mayor porcentaje de degradación en la alimentación en modo batch que en modo semicontinuo, debido a que en esta ultima la DQO se ve afectada, lo que provoca una disminución considerable en el rendimiento de metano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancillo, G. y Medina, A. 2014. Monografías botánicas. Los cítricos. Universitat de València E.G. España.
- Appels, L., Degréve, J., Van der Bruggen, B., Van Impe, J. y Dewil, R. 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* **101**:5743-5748.
- Aragaw, T., Andargie, M. y 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.
- Bougrier, C., Philippe, D. J. y Carrère, H. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chemical Eng. Journal.* **139**: 236-244.
- Calabró, P.S., Pontoni, L., Porqueddu, I., Greco, R. y Malpei, F. 2015. Effect of the concentration of essential oil on orange peel waste biomethanization: Preliminary batch results. *Waste Management.* **48**, 440-447.
- CDANL. 2015. Corporación para el Desarrollo Agropecuario de Nuevo León. Situación de la Citricultura en Nuevo León. www.camponl.gob.mx/oeidruss/docs/citricultura.pdf (consultado septiembre, 2017).
- CEES-ITESM. 1994. Centro de Estudios Estratégicos del Sistema ITESM. Análisis estratégico de los agrupamientos industriales de sectores clave del estado de Tabasco (Cluster)-Industria citrícola (limón y naranja). <http://hdl.handle.net/11285/574888> (consultado octubre, 2017).

- Chávez, G. M. y Aguilar, C. 2012. Aprovechamiento de la industria citrícola. CienciaCierta.uadec.mx No. 29
- Coelho, N. M. G., Droste, R. L. y Kennedy, K. J. 2011. Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaves activated sludge. Water Research. **45**(9):2822-2834.
- CONAGUA. 2016. Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. (consultado octubre, 2017).
- Díaz, B. M., Espitia, V. S. y Molina, P. F. 2002. Digestión Anaerobia: Una aproximación a la tecnología. UNIBIBLOS. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Domínguez-Hernández, E. 2016. Diseño e implementación de un reactor de lecho semifluidizado inverso para el tratamiento anaerobio de un efluente de la industria citrícola. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- EARTH. 2004. Centro para la formación empresarial. Perfil de producto, Naranja (consultado marzo 2017).
- FAO. 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Manual de Biogás (consultado septiembre, 2017).
- FAO. 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Manual de Biogás (consultado diciembre, 2017).
- Farno, E., Baudez, J. C., Parthasarathy, R. y Eshtia, N. 2014. Rheological characterization of thermally-treated anaerobic digested sludge: impact of temperature and thermal history. Water Res. **56**:156-161.

- Ferrer, I., Ponsáb, S., Vázquez, F. y Fontb, X. 2008. Increasing biogás production by termal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochem. Eng. J.* **42**:186-192.
- FIRA. 2016. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama Agroalimentario. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Carne de Bovino. (consultado octubre, 2017).
- Hernández-Vásquez, L. A., Vallejo-Cantú, N. A., Alvarado-Lassman, A. y Méndez-Contreras, J. M. 2017. Tratamiento de un inóculo anaerobio para su pre-hidrólisis y eliminación de patógenos. *Journal CIM*. Vol. 5, No. 2, 1082-1088.
- Hernández-Vásquez, L. A. 2018. Aprovechamiento de un lodo residual de la industria citrícola para la generación de bioenergéticos. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Kaparaju, P. L. N. y Rintala J. A. 2006. Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste. *Environmental technology*, **27**(6) 623-633.
- Koppar, A. y Pullammanappallil, P. 2013. Anaerobic digestion of peel waste and wastewater for on site energy generation in a citrus processing facility. *Energy* **60**:62-68.
- LGPGIR. 2015. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (consultado septiembre, 2017).
- Liao X., Li, H., Zhang, Y., Lui, C. y Chen, Q. 2016. Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment. *Int. Biodeter. Biodegr.* **106**:141-149.

- Lobato-Fuertes, A. 2012. Estudio de la codigestión anaerobia de residuos ganaderos con otros substratos agroindustriales. Tesis Doctorado. Universidad de León, México D.F.
- Luis-Garcez, A. L. 2015. Codigestión de residuos sólidos de la industria cítrica en un digester anaerobio a nivel piloto. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Martín, M. A., Siles, J. A., Chica, A. F. y Martín, A. 2010. Biomethanization of orange peel waste. *Bioresource Technology* 101(23):8993-8999.
- Martínez-Arce, E. 2009. Pretratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales para la producción de biosólidos de clase A. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mora, Z. A., Chávez, C. H., Fonseca, G., Cabra, J. A. y Carmona, S. Y. 2005. Desarrollo de un inóculo microbiano empleando lodos activados para la remoción de ácido sulfhídrico (H₂S) mediante biofiltración. *Revista colombiana de Biotecnología*. **VII**(2):26-34.
- Nakasima, L. M., Taboada, G. P., Aguilar, V. Q. y Velázquez, L. N. 2017. Adaptación de inóculo durante el arranque de la digestión anaerobia con residuo sólido orgánico. *Información Tecnológica*. **28**(1):199-208.
- Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M., Omar, R. y Idris, A. 2013. Batch and semi-continuous biogas production from cattle manure. *International Journal of Engineering and Technology*, **10**(1): 16-21.
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S. y Ho. D. 2017. Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation. *Water Res.* **113**:111-123.

- Parra, O., B. A., Torres-Lozada, L.F. Marmolejo-Rebellón y L. M. Cárdenas-Cleves. 2015. Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ing. Inv. y Tecnología*. **16**(4):515-526.
- Pantoja, Z. G. y Flores, V. F. 2018. El sector citrícola de Nuevo León: caracterización del sistema agroalimentario como plataforma de integración del productor con la agroindustria. *Región y Sociedad*. ISSN E-2448-4849. No. 71
- Pérez, M., L.I. Romero y D. Sales. 1997. Tecnologías anaerobias para la depuración termofílica de vertidos de destilerías vínicas. *Ingeniería del Agua*. **4**:7-16.
- Pourbafrani, M., G. Forgács, I.S. Horváth, C. Niklasson y M. J. Taherzadeh. 2010. Production of biofuels, limonene and pectin from citrus wastes. *Bioresource Technol.* **101**(11):4246-4250.
- Rezzadori, K., S. Benedetti y E. R. Amante. 2012. Proposals for the residues recovery: Orange waste as raw material for new products. *Food bioprod. Process.* **90**(4):606-614.
- Rivas, B., A. Torrado, P. Torre, A. Converti y J. M. Domínguez. 2008. Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *J. Agr. Food. Chem.* **56**(7):2380-2387.
- Roa-Rosas, J. 2016. Estudio integral de un reactor anaerobio de geomembrana para la producción de biogás a partir de excretas de ganado bovino. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba.

- 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.
- Rosas-Mendoza, E. S., Luis-Garcez, A., Vallejo-Cantú, N. A., Méndez-Contreras, J. M. y Alvarado-Lassman, A. 2016. Anaerobic co-digestion of citrus waste with cattle manure for biogás production. Sixth International Symposium on Energy from Biomass and Waste.
- Ruiz, B. y Flotats, X. 2014. Citrus essential oils and their influence on the anaerobic digestion process: An overview. *Waste Management* **34**(11):2063-2079.
- Ruvalcaba, G. J., Flores, L. H, Figueroa, V. U., Núñez, H. G. y Romero, J. J. 2012. Caracterización del manejo y composición química de excretas generadas en establos lecheros familiares de los Altos de Jalisco. Folleto Técnico núm. 3. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco.
- SAGARPA. 2017. Se consolida México como quinto productor mundial de naranja.
www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC_0015-10.aspx# (consultado septiembre, 2017).
- Santiago-Falcón, M. 2006. Estudio de las propiedades funcionales de la fibra dietética a partir de la cáscara de naranja. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Scott-Fogler. H. 2008. Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas. Pearson Education, México, D.F.

- SEMARNAT. 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Indicadores clave y Desempeño Ambiental.
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001623.pdf> (consultado octubre, 2017).
- SIAP. 2009. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Reporte Especial Naranja.
www.infosiap.siap.gob.mx/images/stories/infogramas/100602-reporte-naranja.pdf (consultado septiembre, 2017).
- SIAP. 2015. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera.
www.gob.mx/siap (consultado enero, 2018).
- SIAP-SAGARPA. 2016. Atlas Agroalimentario 2016 (consultado Febrero 2018).
- Viguera-Carmona, S. E., Zafra-Jiménez, G., García-Rivero, M., Martínez-Trujillo, M. A. y Pérez-Vargas, J. 2013. Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. Revista Mexicana de Ingeniería Química Vol. 12, No. 2, 293-301.
- Wikandari, R., Nguyen, H., Millati, R., Niklasson, C. y Taherzadeh, M. 2014. Improvement of Biogas Production from Orange Peel Waste by Leaching of Limonene. BioMed Research International 2015, 1-6.
- Zahid, G. R. y Suthar, S. 2017. Anaerobic digestion of activated sludge, anaerobic granular sludge and cow dung with food waste for enhanced methane production. J. Clean. Prod. **164**:557-566.