



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“GENERACIÓN DE BIOENERGÉTICOS POR  
MÉTODOS TERMOQUÍMICO Y BIOLÓGICO  
A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS PRESELECCIONADOS”

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

PRESENTA:

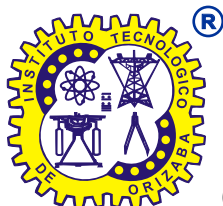
*I.Q. María Fernanda Castillo Vargas*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Alejandro Alvarado Lassman*

CODIRECTOR DE TESIS:

*M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú*



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

MAYO 2023



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 24/mayo/2023  
Dependencia: División de Estudios de  
Posgrado e Investigación  
Asunto: Autorización de Impresión  
OPCION: I

**C. MARIA FERNANDA CASTILLO VARGAS**  
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:  
**CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**  
**P R E S E N T E.-**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, 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:

**"Generación de bioenergéticos por métodos termoquímico y biológico a partir de residuos sólidos urbanos preseleccionados"**

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

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

*Cuahtémoc Sánchez R.*

**Dr. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



OG-13-F06

Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.  
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: [dir\\_orizaba@tecnm.mx](mailto:dir_orizaba@tecnm.mx) [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [orizaba.tecnm.mx](http://orizaba.tecnm.mx)



**2023**  
**SEÑOR**  
**Francisco**  
**VILA**



Orizaba, Veracruz, 18/mayo/2023  
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
P R E S E N T E.-

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

**MARÍA FERNANDA CASTILLO VARGAS**

La cual lleva el título de:

**“Generación de bioenergéticos por métodos termoquímico y biológico a partir de residuos sólidos urbanos preseleccionados”**

Y concluyen que se acepta.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

FIRMA

SECRETARIO: MIQ. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ

FIRMA

VOCAL: DR. ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA

FIRMA

VOCAL SUP.: DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS

FIRMA

TA-09-18



## **Declaración de originalidad y cesión de derechos**

Orizaba, Veracruz, el día 24 del mes de Mayo del año 2023.

El(la) que suscribe

C. Maria Fernanda Castillo Vargas

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 89 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

**“GENERACIÓN DE BIOENERGÉTICOS POR MÉTODOS TERMOQUÍMICO Y  
BIOLÓGICO A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS  
PRESELECCIONADOS”**

del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección del (la) Dr. Alejandro Alvarado Lassman y la MCIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [depi\\_orizaba@tecnm.mx](mailto:depi_orizaba@tecnm.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Maria Fernanda Castillo Vargas

**DEDICATORIAS**

*A Dios, por permitirme cumplir un sueño  
A mi padre a quien dedicaré siempre todos mis éxitos.  
A mi Nicolás el mejor hijo y compañero de vida.  
A mi madre y mis hermanas por su incondicional apoyo.*

## RECONOCIMIENTOS

Al Dr. Alejandro Alvarado Lassman, director de esta tesis, por haberme aceptado en su equipo de trabajo, quien es un excelente investigador, digno de mi admiración e inspiración.

A la M.I.Q Norma Alejandra Vallejo Cantú, codirectora de tesis, quien es una excelente persona y docente siempre estuvo al pendiente y ayudó a resolver todas mis dudas.

A la Dra. Ofelia Landeta Escamilla, Coordinadora académica del posgrado, quien es un excelente ser humano y docente y de quien siempre recibí un trato amable y ayuda para realizar este proyecto de vida.

Al Dr. Erik Samuel Rosas Mendoza, por su invaluable tiempo y asesoría para la realización de este trabajo.

A todos mis profesores desde propedéutico, de los cuales aprendí mucho no solo como profesionista sino también como persona.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca para la realización de esta investigación.

## RESUMEN

“Generación de bioenergéticos por métodos termoquímico y biológico a partir de Residuos Sólidos Urbanos preseleccionados”

**Elaborado por:** I.Q. María Fernanda Castillo Vargas

**Dirigida por:** Dr. Alejandro Alvarado Lassman

M.I.Q Norma Alejandra Vallejo Cantú

La disposición inadecuada de los residuos sólidos urbanos y una composición compleja aun con una separación desde la fuente en donde predominan los residuos orgánicos hace necesaria la búsqueda de tecnologías que resuelvan esta problemática. Se utilizó una combinación de carbonización hidrotérmica (CHT) y digestión anaerobia (DA) como alternativa de valorización de los residuos sólidos urbanos orgánicos (RSUO) provenientes de una planta de separación municipal para la generación de bioenergéticos sólidos y gaseosos. Se utilizó para este fin un reactor de alta presión y un reactor anaerobio híbrido (RAH) a escala laboratorio, alimentándose los RSUO en el primero bajo condiciones de temperatura de 180, 190, 200 y 210 °C y tiempos de residencia de 1, 2 y 3 h con presión autoregulada, obteniéndose un hidrochar sólido y un efluente líquido que se alimentó en modo continuo en el segundo con carga orgánica (Cva) de 5 gDQO/L.d, evaluándose la generación de hidrochar y biogás respectivamente. La combinación de ambas tecnologías logra la formación de un combustible sólido con un poder calorífico superior a los 15 MJ/Kg en la primera etapa y biogás con rendimientos de metano de hasta 0.34 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> en condiciones de 180 °C 1 h con una eficiencia de remoción de la DQO cercana al 100 % en un tiempo de residencia menor a 24 h en la segunda etapa. Los resultados muestran que las condiciones de la reacción fue un parámetro importante que afectaba a la calidad de los coproductos de la HTC (es decir, el hidrochar y bioaceite) y también un factor para la recuperación de metano en el biogás.

**Palabras clave:** Bioenergéticos, Carbonización Hidrotérmica, Digestión Anaerobia, Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos.

## **ABSTRACT**

"Bioenergy generation by thermochemical and biological methods from pre-selected Municipal Solid Waste"

**By:** Q.I. Maria Fernanda Castillo Vargas

**Advisors:** Dr. Alejandro Alvarado Lassman

M.I.Q Norma Alejandra Vallejo Cantú

The inadequate disposal of municipal solid waste and its complex composition, even with separation at the source where organic waste predominates, makes it necessary to search for technologies to solve this problem. A combination of hydrothermal carbonization (HTC) and anaerobic digestion (AD) was used as an alternative for the valorization of organic municipal solid waste (MSW) from a municipal waste separation plant for the generation of solid and gaseous bioenergy. A high pressure reactor and an anaerobic hybrid reactor at laboratory scale were used for this purpose, feeding the MSW in the first one under temperature conditions of 180 °C and time of 1 h with self-regulated pressure, obtaining a solid hydrochar and a liquid effluent that was fed in continuous mode in the second one with organic loading rate (OLR) of 5 gCOD/L.d, evaluating the generation of hydrochar and biogas, respectively. The combination of both technologies produces a solid fuel with a calorific value higher than 15 MJ/Kg in the first stage and biogas with methane yields up to 0.34 LCH<sub>4</sub>/gCOD rem at 180 °C 1 h conditions with a COD removal efficiency close to 100 % in a residence time of less than 24 h in the second stage. The results show that the reaction conditions were an important parameter affecting the quality of the HTC co-products (i.e., hydrochar and bio-oil) and also a factor for methane recovery in the biogas.

**Key words:** Bioenergy, Hydrothermal Carbonization, Anaerobic Digestion, Municipal Solid Waste



## INDICE

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                         | iii |
| LISTA DE TABLAS.....                                                                           | iv  |
| NOMENCLARUTA .....                                                                             | v   |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                             | 1   |
| CAPÍTULO I_FUNDAMENTOS TEÓRICOS                                                                |     |
| 1.1 Residuos sólidos urbanos (RSU).....                                                        | 5   |
| 1.1.1 Clasificación de los RSU de acuerdo a su composición .....                               | 6   |
| 1.1.2 Recolección de los RSU en el municipio de Orizaba, Ver.....                              | 7   |
| 1.1.3 Aprovechamiento de los RSU .....                                                         | 9   |
| 1.2 Residuos sólidos urbanos como bioenergéticos .....                                         | 12  |
| 1.3 Carbonización hidrotérmica .....                                                           | 14  |
| 1.3.1 Proceso de carbonización hidrotérmica .....                                              | 15  |
| 1.3.2 Aplicaciones de la carbonización hidrotérmica en el aprovechamiento de<br>residuos. .... | 17  |
| 1.3.3 Productos de la carbonización hidrotérmica .....                                         | 18  |
| 1.4 Digestión anaerobia de líquidos.....                                                       | 19  |
| 1.4.1 Etapas de la digestión anaerobia.....                                                    | 21  |
| 1.4.2 Aplicación de la DA a residuos líquidos con alta carga orgánica .....                    | 24  |
| 1.4.3 Reactor anaerobio híbrido.....                                                           | 26  |
| 1.4.4 Biogás como fuente de bioenergía.....                                                    | 29  |
| CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS                                                                |     |
| 2.1 Caracterización fisicoquímica de los RSUO.....                                             | 32  |
| 2.1.1. Obtención de la materia prima.....                                                      | 32  |
| 2.1.2 Acondicionamiento de la materia prima (RSUO).....                                        | 32  |
| 2.1.3 Determinaciones realizadas a los RSUO.....                                               | 33  |
| 2.2 Aplicación de la carbonización hidrotérmica .....                                          | 34  |
| 2.2.1 Descripción del reactor .....                                                            | 34  |
| 2.3 Caracterización del bioaceite obtenido en la CHT .....                                     | 35  |
| 2.4 Aplicación de la digestión anaerobia al bioaceite obtenido .....                           | 35  |
| 2.4.1 Descripción del reactor .....                                                            | 35  |
| 2.4.2 Sustratos utilizados .....                                                               | 37  |
| 2.4.3 Etapa de inoculación arranque y estabilización del RAH .....                             | 38  |
| 2.5 Monitoreo del proceso modo continuo del RAH .....                                          | 39  |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6 Evaluación de la producción del biogás obtenido .....                                 | 40 |
| CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN                                                         |    |
| 3.1 Caracterización fisicoquímica de los RSUO.....                                        | 42 |
| 3.2 Aplicación de la Carbonización Hidrotérmica .....                                     | 43 |
| 3.3 Caracterización del bioaceite obtenido en la CHT .....                                | 45 |
| 3.3.1 Demanda química de oxígeno en bioaceite .....                                       | 45 |
| 3.3.2 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles en Bioaceite .....                              | 47 |
| 3.3.3 pH del bioaceite a diferentes condiciones.....                                      | 49 |
| 3.4 Aplicación de la Digestión Anaerobia al bioaceite obtenido .....                      | 50 |
| 3.4.1 Arranque de Reactor anaerobio híbrido .....                                         | 50 |
| 3.5 Monitoreo del proceso modo continuo del RHA.....                                      | 55 |
| 3.6 Evaluación de la producción del Biogás obtenido .....                                 | 59 |
| 3.6.1 Producción de Biogás .....                                                          | 59 |
| 3.6.2 Rendimiento de metano de los bioaceites obtenidos a diferentes<br>condiciones ..... | 60 |
| CONCLUSIONES.....                                                                         | 62 |
| RECOMENDACIONES .....                                                                     | 65 |
| Referencias bibliográficas .....                                                          | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Descripción                                                                                                                                                    | Página |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 1.1    | Banda transportadora de Planta Ecori                                                                                                                           | 11     |
| 1.2    | Aprovechamiento de las diferentes fuentes de bioenergía (Rincón Martínez y Silva Lora, 2015)                                                                   | 14     |
| 1.3    | Reacción de la CHT                                                                                                                                             | 16     |
| 1.4    | Cuatro etapas de la digestión anaerobia (Gould, 2015)                                                                                                          | 23     |
| 1.5    | Diagrama de flujo del proceso de (a) biorreactor anaeróbico de lecho móvil (b) y reactor híbrido anaeróbico de flujo ascendente (Shahzad <i>et al.</i> , 2021) | 27     |
| 1.6    | Vista esquemática del RHA a escala laboratorio (Tufaner y Demirci, 2020)                                                                                       | 28     |
| 2.1    | Metodología general de la presente investigación                                                                                                               | 32     |
| 2.2    | Planta Ecori de Separación de RSU                                                                                                                              | 33     |
| 2.3    | Centrífuga semi-industrial                                                                                                                                     | 34     |
| 2.4    | Reactor para HTC                                                                                                                                               | 35     |
| 2.5    | Esquema del RHA (González Paz <i>et al.</i> , 2015)                                                                                                            | 37     |
| 2.6    | Almacenamiento del bioaceite                                                                                                                                   | 38     |
| 3.1    | RSUO crudo                                                                                                                                                     | 44     |
| 3.2    | DQO <sub>T</sub> contenida en el bioaceite a las diferentes condiciones                                                                                        | 47     |
| 3.3    | DQO <sub>S</sub> contenida en el bioaceite a diferentes condiciones                                                                                            | 47     |
| 3.4    | Contenido de Sólidos Totales en el bioaceite                                                                                                                   | 48     |
| 3.5    | Contenido de Sólidos Volátiles en el bioaceite                                                                                                                 | 49     |
| 3.6    | pH del bioaceite obtenido a diferentes condiciones                                                                                                             | 50     |
| 3.7    | Monitoreo de pH en la etapa de estabilización                                                                                                                  | 51     |
| 3.8    | Producción de biogás etapa de estabilización                                                                                                                   | 52     |
| 3.9    | Remoción de sólidos totales y volátiles                                                                                                                        | 53     |
| 3.10   | Remociones de DQO total y soluble en el RHA                                                                                                                    | 54     |
| 3.11   | Evolución de pH durante la operación del RHA                                                                                                                   | 56     |
| 3.12   | Porcentaje de remociones de ST y SV                                                                                                                            | 57     |
| 3.13   | Monitoreo de DQO modo continuo                                                                                                                                 | 58     |
| 3.14   | Producción diaria de biogás en Litros durante la operación modo continuo                                                                                       | 59     |
| 3.15   | Rendimientos de metano en biogás                                                                                                                               | 60     |

**LISTA DE TABLAS**

| <b>Tabla</b> | <b>Descripción</b>                                      | <b>Página</b> |
|--------------|---------------------------------------------------------|---------------|
| 1.1          | Residuos Sólidos Urbanos (SEMARNAT, 2020)               | 7             |
| 2.1          | Parámetros fisicoquímicos                               | 34            |
| 2.2          | Caracterización fisicoquímica del bioaceite             | 36            |
| 2.3          | Caracterización de los sustratos utilizados             | 39            |
| 2.4          | Parámetros de monitoreo del RHA                         | 40            |
| 3.1          | Caracterización de RSUO                                 | 43            |
| 3.2          | Comparación de resultados con otras investigaciones     | 44            |
| 3.3          | Resultados obtenidos en la CHT                          | 45            |
| 3.4          | Rendimiento porcentual del bioaceite                    | 45            |
| 3.5          | Resultados promedio de la caracterización del bioaceite | 46            |
| 3.6          | Parámetros de alimentación del RAH                      | 60            |
| 3.7          | Relación del bioaceite alimentado diariamente           | 65            |

## NOMENCLARUTA

| Abreviatura      | Descripción                                             |
|------------------|---------------------------------------------------------|
| %                | Por ciento                                              |
| AGVs             | Ácidos grasos volátiles                                 |
| C                | Carbono                                                 |
| °C               | Grado Centígrado                                        |
| CHT              | Carbonización hidrotermal                               |
| CH <sub>4</sub>  | Metano                                                  |
| CO <sub>2</sub>  | Dióxido de Carbono                                      |
| Cva              | Carga Volumétrica Aplicada                              |
| DA               | Digestión Anaerobia                                     |
| DQO              | Demanda Química de Oxígeno                              |
| DQOs             | Demanda Química de Oxígeno Soluble                      |
| DQO <sub>T</sub> | Demanda Química de Oxígeno Total                        |
| h                | Hora                                                    |
| kg               | kilogramo                                               |
| L                | Litro                                                   |
| LF               | Lecho fijo                                              |
| LFI              | Lecho fluidizado inverso                                |
| mg               | Miligramo                                               |
| mL               | mililitro                                               |
| MVA              | Materia Volátil Adherida                                |
| NaOH             | Hidróxido de sodio                                      |
| pH               | Potencial de hidrógeno                                  |
| RSU              | Residuos Sólidos Urbanos                                |
| RSUO             | Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos                      |
| ROC              | Residuos Orgánicos Complejos                            |
| RLSFI            | Reactor de Lecho Semi Fluidizado Inverso                |
| RAH              | Reactor Anaeróbico Híbrido                              |
| SST              | Sólidos suspendidos Totales                             |
| SSV              | Sólidos suspendidos Volátiles                           |
| t                | Temperatura                                             |
| t                | tiempo                                                  |
| UASB             | Reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente |

## INTRODUCCIÓN

México es un país en constante crecimiento y diariamente, según datos obtenidos por la SEMARNAT en 2017, se generan 102,895 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93 % y se disponen en sitios de disposición final 78.54 %, reciclando únicamente el 9.63 % de los residuos generados. Desafortunadamente, debido al desinterés de los municipios por la disposición final de los residuos en nuestro país sigue predominando el manejo básico de los RSU que consiste en recolectar y disponer los residuos en tiraderos a cielo abierto y en el mejor de los casos en rellenos sanitarios, desaprovechando aquellos residuos que son susceptibles a reincorporarse al sistema productivo, lo que disminuiría la demanda y explotación de nuevos recursos, a diferencia de países como Suiza, Países Bajos, Alemania, Bélgica, Suecia, Austria y Dinamarca; donde la disposición final de los residuos es de menos del 5 % en rellenos sanitarios.

El artículo 10 de la LGPGIR establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, sin embargo, se presentan a diversas circunstancias que en muchos casos se escapan de sus capacidades técnicas y financieras, y por el corto tiempo de las administraciones municipales, lo que conlleva a la ruptura de la curva de aprendizaje y por ende a una falta de continuidad en las acciones y proyectos que garanticen una gestión integral de los residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2017). Los RSU pueden ser aprovechados para generación de energía a través de procesos bioquímicos y termoquímicos los cuales tienen mayor potencial energético y mayor capacidad de reducción del volumen de RSU (Nordi *et al.*, 2017).

Existe un proceso alternativo para transformar la biomasa conocido como carbonización hidrotérmica (CHT), que es un proceso de conversión termoquímica a través del cual es posible tratar directamente un sustrato orgánico húmedo para obtener materiales carbonosos para diferentes aplicaciones (Kambo y Dutta, 2015). La principal ventaja es que la técnica se puede utilizar para convertir materiales

orgánicos húmedos en sólidos carbonosos (hidrochar) con alto rendimiento. Como puede convertir materiales de entrada húmedos, no requiere secado antes o durante el proceso. Por lo tanto, esta técnica tiene un uso potencial para la conversión de materias primas como desechos orgánicos, abonos húmedos, lodos de depuración, desechos sólidos municipales, residuos de algas y desechos de procesamiento de alimentos (Jeevahan *et al.*, 2018). A partir de la CHT se obtiene también un líquido rico en carbono y nutrientes que puede ser usado como sustrato en la digestión anaerobia el cual es un proceso que como tecnología de energía renovable, aprovecha un proceso biológico natural mediante el uso de biomasa disponible (por ejemplo, desechos de alimentos, abono animal y cultivos bioenergéticos) para producir biogás (metano renovable). El biogás se puede utilizar para producir electricidad y calor, o se puede mejorar para su uso como combustible de vehículos o inyección a la red de gas natural. El biogás se compone de aproximadamente un 45 a un 65% metano y 30 a 40% de dióxido de carbono (Gould, 2015).

Con el fin de determinar la capacidad de producción de metano, la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico, seleccionar sustratos e inóculos potenciales y predecir el funcionamiento de digestores a escala real, se realizaron ensayos a escala de laboratorio en un reactor híbrido de biopelícula como el de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) el cual determina el valor experimental de producción máxima de metano generado con una cantidad conocida de residuos orgánicos (Gould, 2015; Doublet *et al.*, 2013). Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo es utilizar el proceso de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia a residuos sólidos urbanos de tipo orgánico (RSUO) provenientes del sistema de separación de residuos de la ciudad de Orizaba, Veracruz.

## OBJETIVOS

Utilizar el proceso de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia a residuos sólidos urbanos de tipo orgánico (RSUO) provenientes del sistema de separación de residuos de la ciudad de Orizaba, Ver.

### Objetivos específicos:

- Realizar pruebas de carbonización hidrotérmica a los RSUO utilizando varias condiciones de temperatura y tiempo.
- Arrancar, estabilizar y operar en forma continua un reactor anaerobio híbrido utilizando la fracción líquida obtenida en el proceso de carbonización hidrotérmica.
- Evaluar la producción de biogás del reactor anaerobio híbrido.



# **CAPÍTULO I**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

Los RSU se producen de manera cotidiana por familias principalmente producidos por la preparación de alimentos (Cáceres Bardález, 2017) sin embargo el rápido crecimiento de la población y el alto consumismo de ésta han provocado que los residuos también aumenten, haciendo que para algunos países se vuelva un problema ambiental y de salud. Tal es el caso de México que aun cuenta con un manejo básico de los residuos, ocasionando que únicamente el 13 % sea destinado a rellenos sanitarios, mientras que el 87 % restantes acaben en sitios no apropiados como lo son los tiraderos a cielo abierto, lotes baldíos calles o barrancas (López-Yamunaqué y Ianaconne, 2021).

La definición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), contenida en la fracción XXXIII del Artículo 5 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), establece que son: “Los RSU son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole” (SEMARNAT, 2017).

Los aspectos más significativos encontrados en el diagnóstico de los RSU por parte de la SEMARNAT en 2020 se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.1 Residuos Sólidos Urbanos (SEMARNAT, 2020).

|                                 |                                                                                                                                    |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Generación de residuos</b>   | La generación per cápita calculada fue de 0.944 kg/hab/día y la generación total de residuos en el país se estima en 120,128 t/día |
| <b>Clasificación de los RSU</b> | El 31.56 % corresponde a residuos susceptibles de aprovechamiento, el 46.42 % a residuos orgánicos y el 22.03 % a “otros residuos” |
| <b>Recolección de residuos</b>  | De los residuos generados se recolectan 100,751 t/día, para una cobertura a nivel nacional del 83.87 %.                            |

En los últimos años la gestión de los residuos ha tomado gran importancia ya que se estima que en el 2018 la generación mundial media de toneladas métricas por año fue de 2000 millones y se estima que aumente a 3400 millones de ton/año para el año 2050 (Pham *et al.*, 2015).

### **1.1.1 Clasificación de los RSU de acuerdo a su composición (orgánica e inorgánica)**

El artículo 18 de LGPGIR establece que los residuos sólidos urbanos podrán clasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, para uso con los Programas Estatales y Municipales, para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables (SEMARNAT, 2017).

- **Orgánicos:** Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo, por lo tanto, tiende a degradarse con facilidad.
- **Inorgánicos:** Todo desecho que no es de origen biológico, por lo cual su degradación puede tardar cientos de años (SEMARNAT, 2017).

Estos residuos también pueden ser agrupados según su procedencia, si son peligrosos, por la naturaleza de estos o en función a su disposición final. A continuación, se describen brevemente según su naturaleza ya que ésta es la manera más común de clasificarlos: los residuos orgánicos son desechos que al degradarse producen dióxido de carbono y metano los cuales son gases contaminantes para la atmósfera. Por otra parte, los residuos inorgánicos son desechos que pueden reutilizarse debido a que no se descomponen fácilmente y son generados principalmente de minerales o industrialmente (Quispe, 2020).

La fracción que más contribuye a los residuos en el mundo son los orgánicos ya que representan un 45% del total de los RSU generados, los cuales tienden a pudrirse y generar lixiviados tóxicos para el ambiente los cuales ayudan al rápido aumento del calentamiento global (Tyagi *et al.*, 2018).

Ponce Ballester en 2013 agrupó los residuos orgánicos y mencionó que a esta fracción pertenecen los restos de comida, papel, cartón, madera, restos de madera, y se denomina Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) la otra fracción se denomina inorgánica y es aquella que está hecha de materiales como el vidrio, cerámica y latas, plásticos entre otros.

### **1.1.2 Recolección de los RSU en el municipio de Orizaba, Ver**

Actualmente Orizaba es una ciudad reconocida por el manejo de sus RSU incluso en el año 2018 recibió la escoba de plata por parte de la Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente (ATEGRUS) el cual galardona la limpieza de la ciudad por su manejo de los residuos, ya que desde el 2014 ha presentado un

interés especial por la recolección, clasificación y valorización de los residuos que pueden ser comercializados o reutilizados, todo esto ha sido coordinado por la Dirección de limpia pública de la ciudad. El programa de separación de residuos en orgánico e inorgánico fue uno de los proyectos prioritarios para el ayuntamiento con fines de reciclaje, ya que la ciudad cuenta con un convenio con la empresa privada Geocycle a la cual son entregados los residuos inorgánicos para su reutilización en empresas cementeras lo cual es una práctica que actualmente presenta una solución para la generación de este tipo de residuos (Bautista Castelán *et al.*, 2021).

El reto más grande para que la ciudad lograra este manejo de sus residuos fue la participación por parte de los habitantes, por tal motivo implementaron planes de concientización para la separación de la basura dentro de sus viviendas, volviéndose obligatoria la separación orgánica e inorgánica para que los desechos pudieran ser recogidos por el sistema de limpia pública y así facilitar su recolección. Otra estrategia utilizada para motivar a los habitantes fue el pago puntual de la limpieza pública el cual se hace anualmente, recibiendo hasta un 30 % de descuento para el pago del impuesto predial al precio final. De esta manera se obtuvo el apoyo constante de los ciudadanos y se optimiza la separación de los residuos municipales. Hoy en día el camión recolector pasa los lunes miércoles y viernes para los residuos orgánicos y los días martes jueves y sábado se recolectan únicamente los residuos inorgánicos. (Ayuntamiento de Orizaba, 2018).

La materia orgánica obtenida de la recolección actualmente es utilizada para la elaboración de composta, siendo así que sólo un 10 % de los residuos generados son destinados a un relleno sanitario llamado Mareco ubicado en la ciudad de Cotaxtla, Ver. Con la implementación de estas medidas se han obtenidos grandes beneficios como el mantenimiento de la ciudad en el cual se hace partícipe a los ciudadanos y ya no es sólo responsabilidad del ayuntamiento como en la mayoría de los municipios vecinos (SEFIPLAN, 2019). Dentro de las ventajas de estas medidas, se encuentran la mejora del medio ambiente, disminución de la cantidad de residuos que se llevan a los rellenos sanitarios, concientización hacia el medio

ambiente, disminución de costos por la recolección y manejo de residuos. Una vez que los residuos son recolectados por el camión de limpieza pública son transportados a la planta de separación de la ciudad llamada Ecori, de la cual se hablará más adelante. Según con una evaluación realizada en el CPI de Orizaba obtuvo el 97.5 % de calificación por la cobertura de servicios de recolección y buen manejo de los residuos (Bautista Castelán *et al.*, 2021).

### **1.1.3 Aprovechamiento de los RSU**

#### *Planta Ecori*

Con el objetivo de ser una entidad responsable con el medio ambiente y para cumplir la mayoría de los puntos de la agenda 2030 de la Naciones Unidas en beneficio del mundo; el ayuntamiento de Orizaba, Veracruz, México toma la decisión mediante acuerdo de cabildo adquirir una Planta separadora de Residuos Sólidos Urbanos y es así como el 20 de julio del 2020 se inaugura la planta llamada ECORI la cual a la fecha se mantiene en funcionamiento. De acuerdo con los datos proporcionados por el encargado de la planta separadora, ECORI recibe diariamente cerca de 130 toneladas de RSU diarios, los cuales son separados en orgánicos inorgánicos y metales de los cuales el 60% son inorgánicos y son transportados a la empresa Geocycle para la cogeneración de energía. El otro 40 % son residuos orgánicos los cuales son utilizados para composta, el metal recolectado es vendido a diversas empresas para su reutilización (Ayuntamiento de Orizaba, 2021).

El proceso de separación dentro de la planta empieza con la fase rompedora de bolsa en donde los residuos caen en un contenedor para después ser transportados por una banda la cual retira el material ferroso por medio de un electro imán y es así como por la acción de la gravedad y de acuerdo al peso de los residuos son separados, quedando los orgánicos por debajo de los inorgánicos los cuales son

transportados a las tolvas para ser llevados a su destino final (Ayuntamiento de Orizaba, 2021) en la Figura 1.1 se observa la banda transportadora a la tolva.



Figura 1.1 Banda transportadora de Planta Ecori.

### *Combustibles derivados de residuos*

Los biocombustibles han surgido como alternativa a los combustibles elaborados a partir de fósiles, este tipo de combustibles son generados de fuentes renovables como aceites vegetales o biomasa. Los primeros biocombustibles que surgieron se llamaron de primera generación y provenían de materias comestibles como maíz, caña de azúcar o aceites vegetales. Los combustibles de segunda generación también se producen a partir de materias primas consideradas como sostenibles con la diferencia de que estas materias primas no son usadas para el consumo humano. Las materias primas que se consideran dentro de esta categoría pueden ser cultivos leñosos y residuos de agroindustria, es por esto que requieren tecnologías con procesos avanzados y son llamados también como “biocombustibles avanzados” la ventaja de estos biocombustibles es la mayor eficiencia, ya que se aprovecha la mayor parte de la materia prima suministrada (Palacios, 2019).

Se estima que para el 2030 los residuos sólidos urbano alcancen una cifra de 2600 millones de toneladas es por eso que los combustibles derivados de los residuos

(RDF por sus siglas en inglés) son una buena opción para así darle una gestión adecuada a los residuos y por otra parte disminuir el consumo de los combustibles derivados de fósiles además de que el coste de producción de energía mediante combustibles derivados de residuos es de 0.5 USD/kWh (Yang *et al.*, 2021).

Kopytynski en 2015 define a los combustibles derivados de residuos (CDR) como “un combustible preparado a partir de residuos no peligrosos para su valorización energética mediante co-procesamiento y pueden fabricarse para ser aplicados a la industria cementera, así como a la siderúrgica, e incluso para la generación térmica de energía eléctrica en pequeñas centrales” y menciona que la industria donde más se desarrollan es en la cementera, ya que el 30 % de sus costos de operación es precisamente la energía.

#### *Utilización de los RDF en procesos de cogeneración de energía*

Los RDF también pueden utilizarse en la cogeneración de energía prueba de esto es que existen investigaciones en las que ya se ha estudiado el proceso, a continuación, se hace mención de algunas:

El concreto es el segundo material consumido en el mundo, sólo por debajo del agua y su principal componente es el cemento el cual resulta de la sintetización del Clinker. Este proceso utiliza temperaturas por arriba de los 2000°C y es por eso que requiere de mucha energía para su producción, Güeraca en 2017 comparó la producción de Clinker derivado de petróleo frente a uno derivado de petróleo con una fracción de RSU. En su trabajo concluye que la sustitución del 20 % de petróleo por RSU de alto poder calorífico presentan un ahorro importante aparte de ser una opción ambientalmente viable ya que se valorizan los residuos sólidos urbanos los cuales son destinados a rellenos sanitarios como disposición final lo cual representa un gran problema ambiental, además de que los combustibles derivados de residuos no emiten gases contaminantes a la atmósfera.



Los residuos provenientes de la agricultura también son altos en poder calorífico y es por esto que Piña Hernández *et al.*, 2017 los utilizaron como biomasa para producir hidrocarburos líquidos. Utilizaron el método de la pirolisis con dos estrategias de conversión, una a temperatura constante y la otra mediante una rampa de calentamiento para incrementar el tiempo de residencia del plástico en el reactor lo cual resultó benéfico ya que por ésta estrategia se logró convertir el 70 % de los residuos en un combustible líquido el cual caracterizaron y concluyeron que tiene propiedades muy similares a las del diésel ligero, lo cual lo hace adecuado para ser usado en motores de combustión interna.

## **1.2 Residuos sólidos urbanos como bioenergéticos**

La energía generada a partir de biomasa (materia orgánica derivada de un proceso biológico) se llama bioenergía. Los residuos urbanos tienen un gran potencial para generar biocombustibles y a partir de ellos obtener Bioenergía. Los residuos sólidos como leña, municipales y residuos agrícolas se pueden gasificar para producir calor y electricidad, y los residuos líquidos como los efluentes provenientes de la industria de la caña de azúcar pueden producir etanol y biodiesel (González, 2009).

Los biocombustibles son una alternativa energética ambiental sostenible ya que no provienen de combustibles fósiles que contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero y al cambio climático (Valdés y Palacios, 2016).

Los bioenergéticos tienen grandes ventajas como lo son económicas ya que reducen los costos mejorando la calidad de los productos lo que mejora la competitividad, ambientales creando productos que se pueden reciclar y que son biodegradables ayudando a la planeta (Montiel, 2010). Principalmente se distinguen tres rutas de conversión: termoquímica, fisicoquímica y biológica. En la Figura 1.2 se pueden observar las fuentes de energía que se pueden producir a partir de residuos.

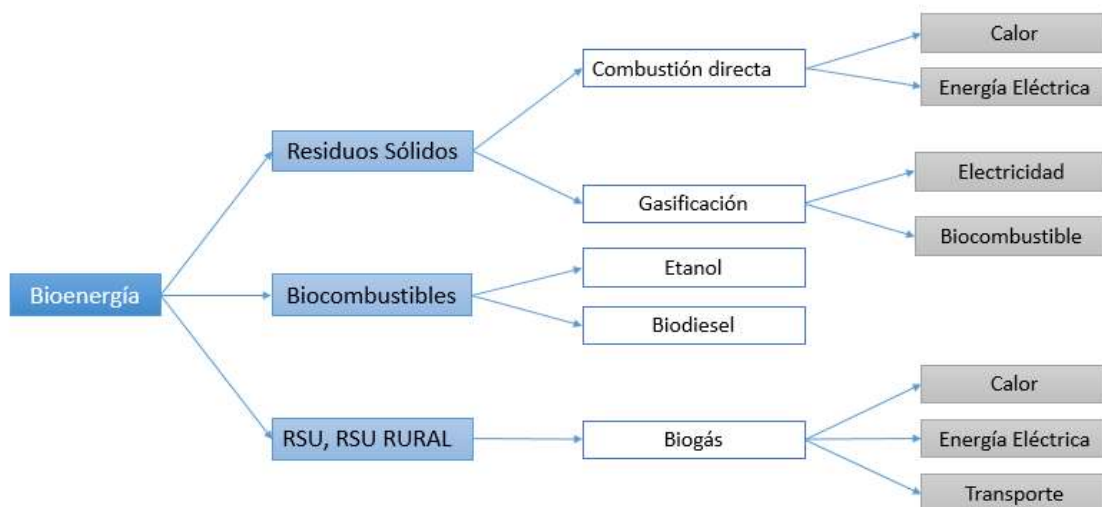


Figura 1.2 Aprovechamiento de las diferentes fuentes de bioenergía (Rincón Martínez y Silva Lora, 2015).

Nava-Pacheco *et al.* 2019 evaluaron el potencial energético de los residuos sólidos orgánicos producidos a partir de los principales productos agroindustriales del estado de Veracruz, para ello seleccionaron los diez cultivos de mayor producción en el estado y el poder calorífico de cada uno de ellos. Con esto pudieron calcular las toneladas de residuos generadas y el potencial bioenergético que posee cada uno y posteriormente calcularon el potencial bioenergético total, con lo que concluyeron que Veracruz tiene un potencial bioenergético de 13000 PJ por año siendo la caña de azúcar el principal generador de residuos seguido de los cítricos lo cual colocaría al estado de Veracruz como el mayor proveedor a nivel nacional de energía renovable a partir de biomasa.

A continuación, se mencionan algunos biocombustibles generados a partir de residuos:

El Bioetanol es un producto que se produce por la degradación de azúcares presentes en granos como cereales y la caña de azúcar (Montiel, 2010). Es una alternativa ambiental ya que puede producirse a partir de residuos agroindustriales por medio de procesos biológicos (Vargas Corredor y Pérez Pérez, 2018). La producción de este producto consta de cuatro etapas un pretratamiento que puede

ser mecánico, térmico, biológico o químico, hidrólisis enzimática, detoxificación y fermentación, de la cual se obtienen como productos finales un alcohol que presenta propiedades del etanol, dióxido de carbono y moléculas de ATP que consumen los microorganismos en su metabolismo anaeróbico (Sánchez *et al.*, 2010).

El biodiesel se produce a partir del intercambio del grupo orgánico de un éster con el grupo orgánico de un alcohol a través de una reacción química entre los ácidos grasos provenientes de una gran variedad de cultivos principalmente del metanol o etanol y aceites vegetales (Montiel, 2010).

El bagacillo de caña, el polvillo de fique y el afrecho de yuca, residuos agroindustriales, se caracterizan por ser biomasa lignocelulósica y al mismo tiempo residuos agroindustriales, por lo cual han sido de gran interés para la producción de biodiesel y otros biocombustibles. (Muñoz *et al.*, 2014)

El biogás es el producto gaseoso que se obtiene mediante la descomposición bacteriana, está compuesto principalmente por metano (50 – 60 %), seguido de CO<sub>2</sub> y algunos otros gases en menor porcentaje como el hidrógeno y nitrógeno (Yepes *et al.*, 2008), puede obtenerse principalmente de residuos orgánicos como las frutas, tallos y hojas. El biogás obtenido puede utilizarse para lámparas, calentadores, estufa, motores a gas, de igual manera se puede producir energía eléctrica o térmica y como biocarburantes (Valdés y Palacios, 2016; Yepes *et al.*, 2008)

### **1.3 Carbonización hidrotérmica**

Existe un proceso relativamente nuevo llamado carbonización hidrotérmica (CHT) de la biomasa, en el cual es posible tratar la biomasa húmeda, sin necesidad de un secado previo la cual ha mostrado resultados prometedores ya que utiliza temperaturas relativamente bajas en comparación con otros métodos como la pirolisis y por tiempos cortos de conversión. Una de las principales ventajas es la capacidad de procesar materia prima como lo son los residuos sólidos urbanos.

El carbón obtenido de este proceso presenta propiedades fisicoquímicas diferentes de acuerdo a la biomasa del que fue obtenido lo cual puede variar sus aplicaciones que incluyen la mejora de suelos, la producción de bioenergía y la eliminación de la contaminación de las aguas residuales (Kambo y Dutta, 2015). Este proceso térmico se realiza a temperaturas relativamente bajas que van desde los 180 a 375 °C y presión autogenerada, convirtiéndose en una opción atractiva para la valorización de distintos tipos de residuos (De la Rubia *et al.*, 2018).

### 1.3.1 Proceso de carbonización hidrotérmica

Esta tecnología se basa en introducir una muestra húmeda en un reactor herméticamente cerrado, el cual alcanza una temperatura en el rango de 170 °C a 350°C, la presión dentro del reactor se autogenera y no tiene mayor influencia en el proceso. Con un tiempo de reacción determinado, se dan diferentes reacciones, siendo las más importantes la carbonización y la deshidratación, que hacen que los compuestos orgánicos que están disueltos o dispersos en el agua formen un material sólido carbonoso, conocido como hidrochar. En el reactor se generan gases, pero con una concentración baja que va del 2 % al 5 %, mientras que el material carbonoso representa entre el 50 % al 80 %. La CHT tiene las siguientes ventajas: no utiliza reactivos químicos, el equipo es sencillo, los costos son bajos y los tiempos de tratamiento cortos (Flores *et al.*, 2020).

La CHT es un proceso exotérmico capaz de reducir la cantidad de oxígeno e hidrógeno del carbón generado respecto de la alimentación de partida. La reacción que se lleva a cabo en el proceso de CHT se muestra en la Figura 1.3:

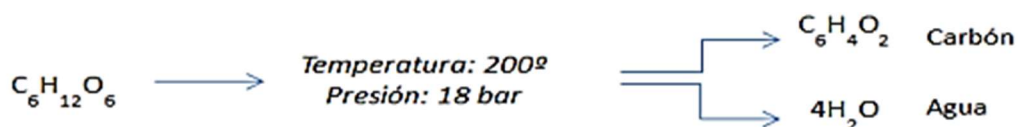


Figura 1.3 Reacción de la CHT,

La CHT comprende las etapas de hidrólisis de la biomasa formando moléculas más pequeñas, deshidratación y condensación. Las condiciones de reacción que se emplean en el proceso son suaves, con temperaturas entre 180 hasta 350 °C y tiempos de reacción de varias horas. Las presiones del sistema son autógenas, sin necesidad de introducir presión adicional. Tiempos de reacción muy largos favorecen la formación de productos gaseosos y la cantidad de carbono formada se ve disminuida. Por otro lado, la densidad energética del carbono aumenta conforme aumenta las condiciones severas de reacción (Ponce Ballester, 2013).

La biomasa procedente de materiales lignocelulósicos suele poseer un contenido de agua de entorno al 40 %. Los procesos térmicos tradicionales incluyen un pretratamiento inicial de la muestra para modificar el contenido de agua de la biomasa. Sin embargo, el proceso de CHT no requiere este tipo de pretratamiento. A diferencia entre los otros métodos químico-térmicos, el proceso de CHT tampoco requiere otros pretratamientos como por ejemplo el tamizado de la biomasa, el control de densidad de la misma u otros tratamientos para mejorar el manipulado de las muestras. El carbón procedente de CHT es fácilmente manipulable, estable y no-tóxico (Ponce Ballester, 2013).

Flores *et al.*, (2020), utilizaron la carbonización hidrotérmica para el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre, donde utilizaron un reactor a alta temperatura para precipitar un lodo que arrastra la materia orgánica y el cromo, los resultados muestran que las variables tiempo y temperatura influyen en el proceso. En el proceso CHT se observó que el tiempo es un factor importante, a medida que aumenta esta variable el tratamiento es mejor porque se logra mayor disminución de la DQO y del cromo, esto sucede también con la temperatura, un incremento de 200 °C a 250 °C hace que el proceso sea más efectivo.

### **1.3.2 Aplicaciones de la carbonización hidrotérmica en el aprovechamiento de residuos.**

Existen muchos reportes científicos respecto al aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos por medio de la CHT, a continuación, se hará mención de algunos de ellos:

Existen también trabajos que han utilizado catalizadores para hacer más efectiva este proceso, tal es el caso de Gauchi Cabrera (2019) hidrocarbonizó el bagazo de caña en un reactor prototipo para después obtener caracterizar fisicoquímicamente el carbón obtenido, pero junto con la materia prima adicionaron agua y acetato de butilo como solvente dentro del reactor y cerrado herméticamente. Utilizó temperaturas de 200 °C y 250 °C variando también el tamaño de partícula (malla 35 y 60) y la masa del bagazo de caña (10, 15 y 20 g) el tiempo fue otra variable manipulada con tiempos de residencia de 4 y 12 horas. De los resultados de los análisis concluyó que las mejores condiciones del proceso fueron 250 °C, 20 g de bagazo, 12 horas y que el área superficial del carbón obtenido fue de 16.44 m<sup>2</sup>/g.

Chaparro-Garnica *et al.*, (2020), estudiaron una alternativa para la fabricación de hidrocarburos de bajo costo y amigable con el medio ambiente producidos a partir de residuos de cáñamo usando la hidrocarbonización agregando ácido fosfórico en bajas concentraciones (25 % p/p) y un tratamiento posterior de activación. El hidrochar obtenido a partir de este proceso fue comparado con un carbón activado comercial de lo cual obtuvieron que tienen propiedades similares como la superficie específica, además observaron que a través del uso del ácido fosfórico hay un rendimiento en cuanto a un mayor desarrollo de la porosidad que los carbones activados preparados en las mismas condiciones y con los mismos precursores mediante el método de activación convencional.

### 1.3.3 Productos de la carbonización hidrotérmica

A partir de este método térmico se obtienen tres productos principales, la parte sólida se conoce como hidrochar, a la fracción líquida se llama Bioaceite y también se obtiene un gas los cuales se describen a continuación:

El Bioaceite es un producto en fase líquida cuya producción depende del porcentaje de la humedad de la biomasa a partir del cual fue obtenido, pero puede ser aprovechada ya que no necesita de un secado posterior como sucede con el hidrochar, lo que hace que los costes de producción se reduzcan siendo una ventaja. Esta fracción líquida puede aprovecharse para la producción de productos químicos o biocombustibles a partir de la digestión anaerobia (De la Rubia *et al.*, 2018) ya que queda con una concentración de al menos un 15 % del carbono inicial (Broch *et al.*, 2013)

Se han evaluado tratamientos químicos y biológicos para la fracción líquida de la CHT. La oxidación por aire húmedo permitió reducir el carbono orgánico total (COT) hasta un 60 % (Aragón-Briceño *et al.*, 2021). La digestión anaeróbica de esa fracción líquida se ha sugerido como una ruta potencial para optimizar la recuperación de energía (Becker *et al.*, 2014; Smith y Ross, 2014).

Como consecuencia, vale la pena considerar la utilización de la fase líquida para la evaluación de la biodegradabilidad aeróbica.

El hidrochar es un material sólido carbonoso y es el principal producto obtenido de la CHT es un recurso valioso y es superior al biochar en ciertos aspectos. Por ejemplo, contiene un reducido de metales alcalinos y alcalinotérreos y de metales pesados, y un mayor poder calorífico en comparación con el biocarbón producido a la misma temperatura (Kambo y Dutta, 2015).

El hidrochar, producto de CHT se puede separar en una fracción sólida y otra líquida. La fracción sólida contiene una mayor proporción de C<sub>2</sub> y menor de O<sub>2</sub> que

la biomasa de partida, como consecuencia de las reacciones de deshidratación y descarboxilación que tienen lugar, y un bajo contenido en cenizas derivado de la liberación de los componentes inorgánicos a la fase líquida durante el proceso (Fang *et al.*, 2018).

Las partículas del carbón obtenido en partir del proceso CHT tienen forma esférica y son de un tamaño de micrómetros. Los átomos de carbono tienen una hibridación  $sp_2$  lo que le confiere ese aspecto negro característico carbón de CHT se puede utilizar para catálisis, adsorción superficial y almacenamiento de energía, entre otros. Una Tonelada de carbón obtenido vía CHT evita entrone a 2.2 toneladas de  $CO_2$  a la atmósfera (Ponce Ballesteros, 2013).

Entre el 3 y el 6.1 % del carbono introducido se transfiere a la fase gaseosa.

Debido al mencionado proceso de descarboxilación, el  $CO_2$  se detecta predominantemente en la fase gaseosa. La concentración de  $CO_2$  se sitúa en torno al 70 – 90 %, dependiendo del sustrato y de las condiciones de operación. Además, se ha medido parcialmente una concentración no despreciable de hidrocarburos. En este caso, la dispersión de las trazas de hidrocarburos se sitúa entre el 1 - 4 % y > 10 % (Ramke *et al.*, 2009)

#### **1.4 Digestión anaerobia de líquidos**

La digestión anaerobia (DA) en un proceso biológico complejo llevado a cabo por microorganismos que no requieren oxígeno para vivir. El producto principal de este proceso es un gas compuesto principalmente por metano, seguido de dióxido de carbono. En esta técnica los microorganismos descomponen la materia compleja como los carbohidratos, proteínas y grasas en moléculas más sencillas solubles en agua (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) (Gould, 2015).



Este proceso ocurre de manera natural cuando las bacterias degradan la materia orgánica en ambientes sin oxígeno. Una amplia variedad de residuos orgánicos puede ser degradados por éste proceso y generar así metano (Molino *et al.*, 2013).

La DA se ha utilizado como un proceso sustentable para la generación de bioenergía a partir de vario tipos de residuos orgánicos, lo cual ayuda también en la reducción de los gases de invernadero, los sustratos más utilizados para la DA son los residuos agrícolas, los industriales y los urbanos (El – Fadel *et al.*, 2013).

### *Factores físicos y químicos*

Como todo proceso biológico existen condiciones en las cuales se debe llevar a cabo la digestión anaerobia los cuales favorecen a que los microorganismos se desarrollen de manera adecuada para realizar su función, en éste caso degradar la materia de los residuos, es por ese motivo que es de gran importancia conocerlos y controlarlos durante el proceso (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005).

Uno de los factores más importantes es la composición del sustrato ya que si cuenta con un alto contenido de sólidos se requiere de una etapa inicial llamada hidrólisis para que pueda obtenerse un sustrato soluble, ésta etapa se ve afectada por la temperatura (Xia *et al.*, 2016; Lew *et al.*, 2011; Zeeman, 1991) la cual también es un parámetro importante ya que se puede trabajar en temperaturas termofílicas (55-60 °C o mesofílicas (35 – 40 °C) (El–Fadel *et al.*, 2013) las altas temperaturas favorecen a la DA ya que acortan el tiempo de reacción y por ende el tiempo de retención hidráulica del reactor ya que favorece la separación líquido – sólido de la biomasa (Van Lier *et al.*, 1996).

Sin embargo, las temperaturas termófilas también pueden contribuir al incremento de amoníaco libre lo cual resulta inhibitorio para los microorganismos lo cual puede alterar el proceso de manera negativa, es por esto que las temperaturas mesófilas

resultan ser las más aceptables actualmente para hacer el proceso más estable, aunque incluyen tiempos de retención más largos (Ostrem *et al.*, 2004).

La acidez dentro del proceso es un parámetro importante ya que si el pH está por debajo de 6.5 se detiene la eliminación de ácidos del sistema ocasionando que la tasa de eliminación se reduzca lo cual puede inhibir el proceso causando agriamiento en el digestor, es por esto que se establece un parámetro de pH de entre 6.6 a 7.6 dentro del digestor (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005).

Un contenido bajo de sólidos por debajo del 10 % suele presentar mejores condiciones de operación es por eso que la biomasa debe ser alta en porcentaje de humedad. Otro aspecto importante son los nutrientes dentro del proceso tales como carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales los cuales favorecen el crecimiento de los microorganismos (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005).

Existen parámetros de operación importantes como lo son la carga volumétrica, el tiempo de retención hidráulica, de los cuales se detallarán más adelante.

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

El proceso general de conversión de materia orgánica compleja en metano y dióxido de carbono puede ser dividido en cuatro pasos como se muestra en la Figura 1.4, a saber, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El número encerrado en un círculo en la Figura 1.4 corresponde a cada paso que se describe a continuación:

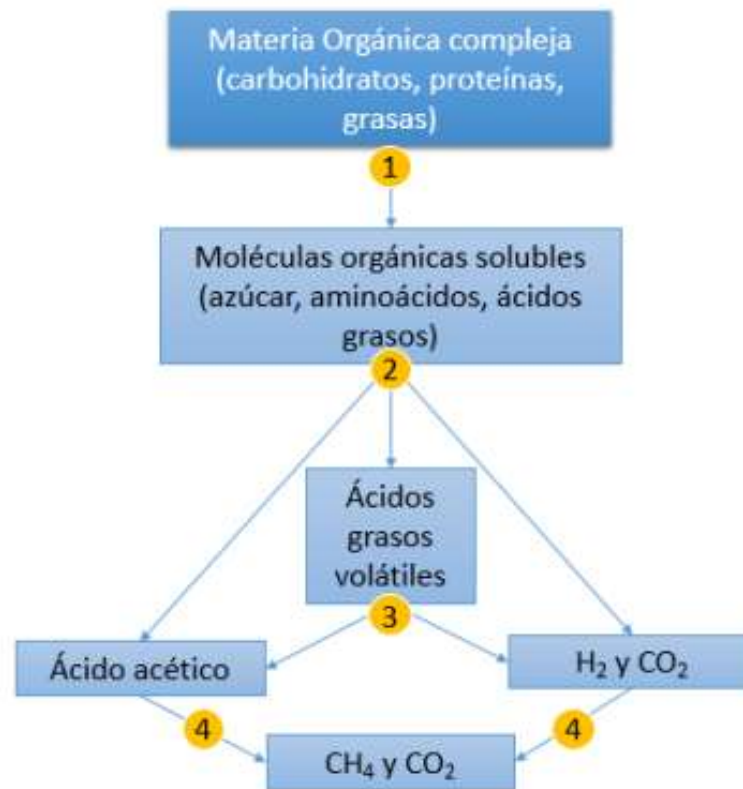


Figura 1.4 Cuatro etapas de la digestión anaerobia (Gould, 2015).

En un digestor anaeróbico, los cuatro procesos ocurren simultáneamente. Cuando un digestor anaeróbico funciona correctamente, la conversión de los productos de los tres primeros pasos en biogás es prácticamente completa, por lo que la concentración de estos productos es baja en cualquier momento (Gould, 2015).

### *Hidrólisis*

La hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaerobia y lleva a cabo la descomposición del sustrato orgánico complejo insoluble como lo son los carbohidratos, las proteínas y lípidos en sustancias más sencillas llamadas monómeros y polímeros solubles. En ésta etapa las enzimas como la celulosa, proteasa y lipasa actúan como catalizadores para así favorecer la fermentación para convertir las proteínas en aminoácidos, los lípidos en ácidos grasos (Parawira 2012;

Ostrem *et al.*, 2004) los cuales son utilizados como sustrato para la siguiente etapa del proceso.

### *Acidogénesis*

Durante la acidogénesis, las bacterias acidogénicas fermentativas convierten los productos de hidrólisis en productos intermedios como ácidos grasos volátiles (AGV) (fórmico, acético propiónico, butírico, valérico), otros productos (ácidos láctico y succínico, alcoholes y cetonas), y gases como el dióxido de carbono y el hidrógeno; siendo el acetato el principal producto de la fermentación de los hidratos de carbono. Este paso rápido puede conducir a la acumulación de AGV (Martínez, 2019).

### *Acetogénesis*

En esta etapa los ácidos grasos volátiles de mayor tamaño que no pudieron convertirse en la etapa anterior terminan por ser transformados en acetatos aptos para la metanogénesis, en esta etapa también se produce hidrógeno el cual es consumido por los metanógenos (Meegoda *et al.*, 2018).

### *Metanogénesis*

Es la etapa final en la descomposición de los carbones orgánicos en metano, es producido por los metanógenos los cuales se clasifican en tres grupos según su uso de sustrato: hidrogenotrófico, aceticlástico y metilotrófico. Los hidrogenotróficos predominan en la metanogénesis de sedimentos marinos profundos, en el tracto gastrointestinal de humanos y animales, mientras que los aceticlásticos son capaces de dividir el acetato para formar metano y dióxido de carbono, estos son los principales productores de metano en digestores anaerobios y humedales (Lyu *et al.*, 2018).

### 1.4.2 Aplicación de la DA a residuos líquidos con alta carga orgánica

La digestión anaerobia de los residuos orgánicos se ha convertido en una prometedora solución para ayudar a reducir los problemas de gestión de los RSU, es por esto que recientemente se han publicado varios artículos sobre el proceso de la DA.

En México el procesamiento de cítricos genera al año 0.7 toneladas de residuos, es por eso que Rosas-Mendoza *et al.* (2018), trataron los efluentes de industria de cítricos ubicada en el estado de Veracruz, México a través de la digestión anaerobia obteniendo biogás el cual evaluaron para ser usado como fuente de energía. Para la realización de esta investigación usaron un Reactor Híbrido Anaerobio constituido en dos partes, un lecho fijo y uno fluidizado inverso, en un ambiente mesofílico. Obtuvieron una remoción de DQO soluble del 85 % y de ST y SV del 42 y 53 % y rendimientos de metano de 0.15 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> operando el reactor en modo continuo. Concluyeron que los residuos de cítricos pueden ser utilizados para la generación de Bioenergía.

Salgado–Hernández *et al.* (2019), utilizaron la fracción líquida de los Residuos Sólidos Orgánicos municipales para su DA, previamente realizaron un tratamiento con ácido orgánico (acético) para mejorar la etapa de la hidrólisis lo cual resultó favorable ya que ayudó a que la solubilidad de la materia orgánica mejorara. Posteriormente realizaron un estudio a nivel piloto utilizando un Reactor hidrolítico donde obtuvieron un mejor rendimiento en la hidrólisis y una remoción mayor de DQO en un periodo más corto gracias al pretratamiento con ácido. Finalmente realizaron una comparación entre el efluente pre tratado y sin tratamiento en un Reactor Semi-Fluidizado Inverso (RLSFI) donde nuevamente resultó benéfico el pretratamiento ya que obtuvieron una remoción del 55.1 % de DQO y una generación de biogás de 216.89 mL/h con un rendimiento de metano de 0.19 L CH<sub>4</sub>/g DQO<sub>rem</sub> en promedio, mientras que para el caso del efluente sin tratar se

obtuvo una remoción de DQO de 54.57 % y una generación de biogás de 191.63 mL/h con un rendimiento de metano de 0.20 L CH<sub>4</sub>/g DQO<sub>rem</sub> en promedio.

Wirth *et al.* (2015), investigaron el uso de la fracción líquida obtenida del proceso de carbonización hidrotermica de lodos residuales como sustrato para la digestión anaeróbica. El rendimiento del proceso a 37 °C (mesofílico) y 55 °C (termofílico) se determinó con base en dos filtros anaeróbicos idénticos de alimentación continua (26 L cada uno) operados durante 20 semanas. Durante la operación, la tasa de carga orgánica se incrementó gradualmente de 1 a 5 g DQO / L día. Esto disminuyó el tiempo de retención hidráulica de 34 a 5 días. No se observaron diferencias significativas en la producción de metano ya que ambos reactores produjeron hasta 0.18 L CH<sub>4</sub>/g DQO<sub>rem</sub>. El aumento de la temperatura no tuvo ningún efecto sobre la eficiencia de eliminación de DQO en estado estacionario con ambos reactores estabilizados en 68–75 %. La fracción líquida del CHT proporcionó macro y micronutrientes en concentraciones suficientes durante todo el experimento. Este estudio se llevó a cabo en dos sistemas idénticos de filtro anaeróbico. La pieza central de cada sistema era un reactor de acero inoxidable con un volumen de trabajo hidráulico de aproximadamente 30 L. Cada reactor tenía una ventana de vidrio acrílico en su camisa metálica para controlar el nivel de líquido. Se instaló un tamiz a unos 5 cm del fondo del reactor para facilitar la eliminación de los sedimentos o del exceso de lodo.

Castro Olarte *et al.* (2019), evaluaron la eficiencia de la remoción orgánica en aguas residuales utilizando un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 14 horas con un caudal de alimentación de 35 mL/min en un rango de temperatura del agua residual de 10° y 19° C lo cual mostró una mejor eficiencia en la remoción de materia orgánica de 33.6 % hasta el 76.9 %.

Shahzad *et al.* (2021), trataron aguas residuales de la industria textil mediante la digestión anaerobia para evaluar el rendimiento de un reactor anaeróbico de lecho

móvil y del reactor anaeróbico híbrido de flujo ascendente (UAUR por sus siglas en inglés) los cuales se pueden observar en la Figura 1.6, durante su investigación aumentaron la tasa de carga orgánica de 0.6 a 12 KgDQO/m<sup>3</sup>/día y las condiciones temperatura de 35 °C (mesófila) a 55 °C (termófila) lo cual incrementó la eliminación de DQO (de 60 a 70 %), la producción volumétrica de Biogás y el contenido de metano.

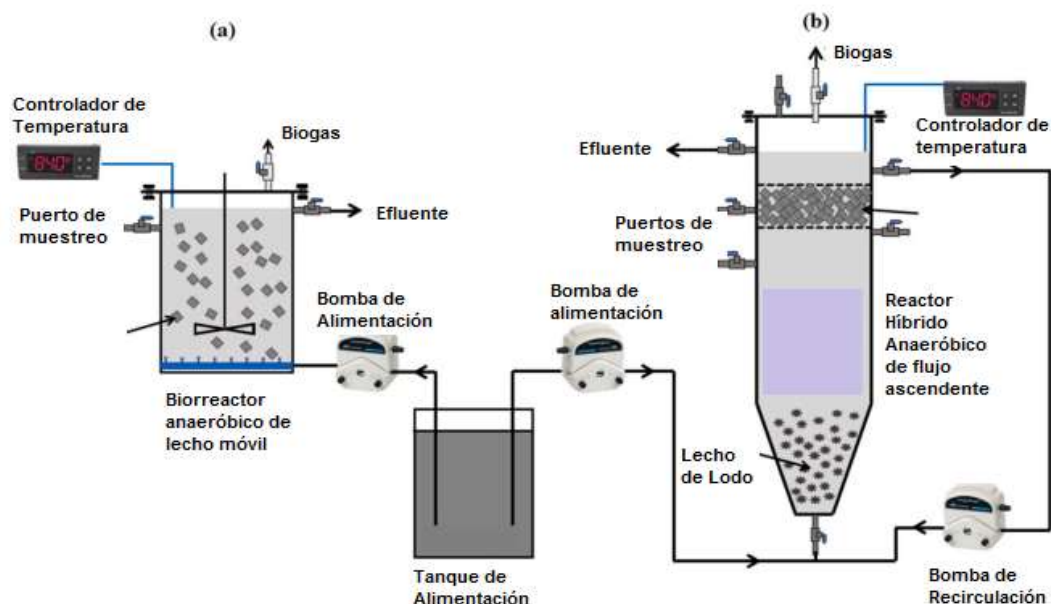


Figura 1.5 Diagrama de flujo del proceso de (a) biorreactor anaeróbico de lecho móvil (b) y reactor anaerobio híbrido de flujo ascendente (Shahzad *et al.*, 2021).

### 1.4.3 Reactor anaerobio híbrido

Existen numerosas tecnologías capaces de eliminar materia orgánica de un residuo de forma anaerobia. Las técnicas más prometedoras son aquellas que retienen los sólidos dentro del reactor independientemente del líquido, con lo que se separan el tiempo de retención celular (SRT) del tiempo de retención hidráulico (HTR). A este tipo de reactores se les llama en general sistemas de alta concentración de biomasa o de alta carga. Entre ellos se encuentran el filtro anaerobio, AUSB, EGSB y el reactor híbrido (Soroa del campo *et al.*, 2006)

El reactor anaerobio híbrido (RAH), es un sistema mixto que combina un UASB en su parte inferior seguido de un filtro anaerobio en la parte superior, sustituyendo así el sistema de gas- sólido que lleva el UASB por material de relleno (Soroa del campo *et al.* 2006), éste sistema híbrido fue desarrollado con el fin de mejorar el rendimiento del reactor, la eficiencia de la producción de biogás y la capacidad de retención de biomasa, en éste tipo de reactores es de gran importancia el material de soporte.

Algunas de las ventajas que presenta este reactor frente a los otros sistemas anaerobios son las siguientes: Se evita el problema de la obstrucción que tiene el filtro anaerobio mediante la eliminación de relleno de la parte inferior del reactor. Esta obstrucción suele ocurrir debido principalmente a la presencia de sólidos suspendidos y grasa de alimentación. En el RAH (Figura 1.5) la mayor parte de la materia orgánica e elimina en la parte de lecho de fango, actuando el relleno a modo de desgasificador más que de soporte para el crecimiento bacteriano (Soroa del Campo *et al.*, 2006). Se reduce la perdida de biomasa que tiene el UASB debido a la sustitución del separador gas-sólido por relleno. Este relleno, por una parte, favorece la granulación y hace que una mayor cantidad de fango vuelva al lecho.

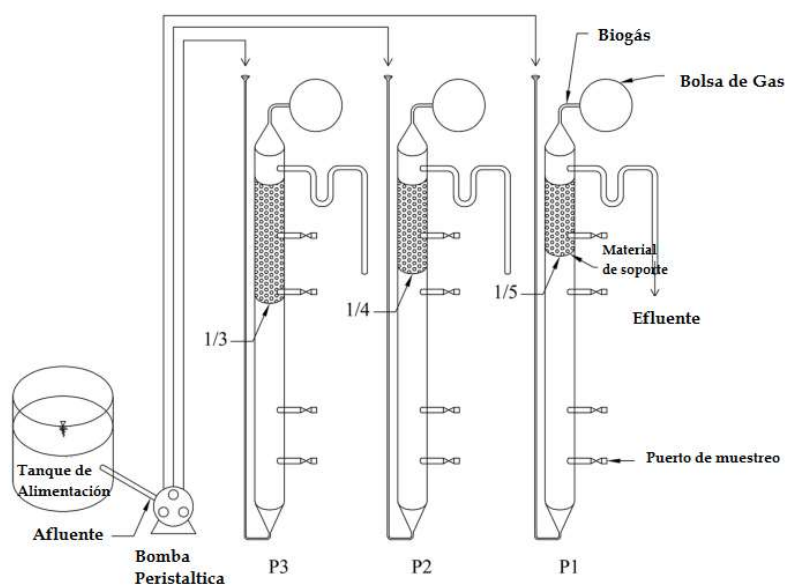


Figura 1.6 Vista esquemática del RHA a escala laboratorio (Tufaner y Demirci, 2020).



*Criterios de operación del RAH*

La carga orgánica volumétrica (Organic Loading Rate, OLR) es la variable normalmente empleada para el diseño y dimensionado de reactores anaerobios. Se calcula de la siguiente manera:

$$OLR = \frac{C \cdot Q}{V}$$

Donde OLR es la carga orgánica (Kg DQO/m<sup>3</sup>·día); C es la concentración en DQO del agua residual (Kg/m<sup>3</sup>); Q es el caudal del efluente (m<sup>3</sup>/día); y V el volumen del reactor (m<sup>3</sup>). Conociendo la concentración y caudal del influente, se selecciona una OLR apropiada (basada normalmente en los resultados experimentales obtenidos en una planta piloto) de manera que se obtiene el volumen del reactor necesario. No obstante, su volumen total lo marcan, además, otros parámetros como la velocidad del biogás producido o a la altura mínima necesaria para la zona de clarificación (Soroa del Campo *et al.*, 2006).

El tiempo de retención hidráulico (HRT) se define como el tiempo que el agua influente permanece dentro del reactor, y se calcula según la siguiente ecuación:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

Donde HRT es el tiempo de retención hidráulico (día); V es el volumen del reactor (m<sup>3</sup>), y Q es el caudal del influente m<sup>3</sup>/día). Es importante que esta variable tenga un valor mínimo puesto que el agua residual debe residir un intervalo mínimo de tiempo para que los microorganismos dispongan de suficiente tiempo para degradar la materia orgánica, especialmente la de tipo coloidal o lentamente biodegradable (Soroa del Campo *et al.*, 2006).

#### **1.4.4 Biogás como fuente de bioenergía**

El biogás que se produce de la digestión anaerobia de los RSU puede ser utilizado como energía, está compuesto principalmente de metano (35 a 40 %) y Dióxido de Carbono aunque éste último en menor porcentaje (Matzakas *et al.*, 2017). La composición del biogás puede variar de acuerdo con la composición del sustrato. Se compone también de otros gases como los son el amoníaco, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y monóxido de carbono (Sun *et al.*, 2015).

Países altamente desarrollados han mostrado interés en la producción de Biogás como alternativa para la generación de electricidad, tal es el caso de China quien en 2017 tuvo una capacidad de producción de 500 MW lo cual demuestra un alto potencial de generación y lo situó en el segundo país con mayor producción de biogás, solo por debajo de Alemania (Maghanaki *et al.*, 2013) sin embargo se encuentra en etapas iniciales. Este biogás es obtenido de la co-digestión de biomasa proveniente de residuos agrícolas. China planea ampliar la generación de Biogás desarrollando plantas de biometano a gran escala (Lu y Gao, 2021).

Las aplicaciones del biogás incluyen su uso como combustible para vehículos después de enriquecer su composición en metano a través de un proceso de depuración y para la producción de calor y electricidad a través de la quema en un equipo especial llamado de calor y energía combinados. El uso de biometano como combustibles para vehículos presenta algunos beneficios ya que no requiere amplias modificaciones del vehículo, y es una tecnología que ya ha sido probada en la práctica (Matzakas *et al.*, 2017).

# **CAPÍTULO 2**

# **MATERIALES Y MÉTODOS**

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se da a conocer la metodología utilizada mencionando los materiales y técnicas que se siguieron para la realización de la presente investigación la cual, se dividió en dos etapas, la primera en la carbonización de los RSUO para la obtención de la fracción líquida (Bioaceite) y su caracterización y la segunda en la DA del bioaceite obtenido de la CHT, para así evaluar el contenido de metano del gas resultante y el rendimiento del Reactor Híbrido Anaerobio (RHA)

A continuación, en la Figura 2.1 se presenta un diagrama de bloques con la metodología general y posteriormente se describe detalladamente el proceso, así como los materiales y métodos utilizados.

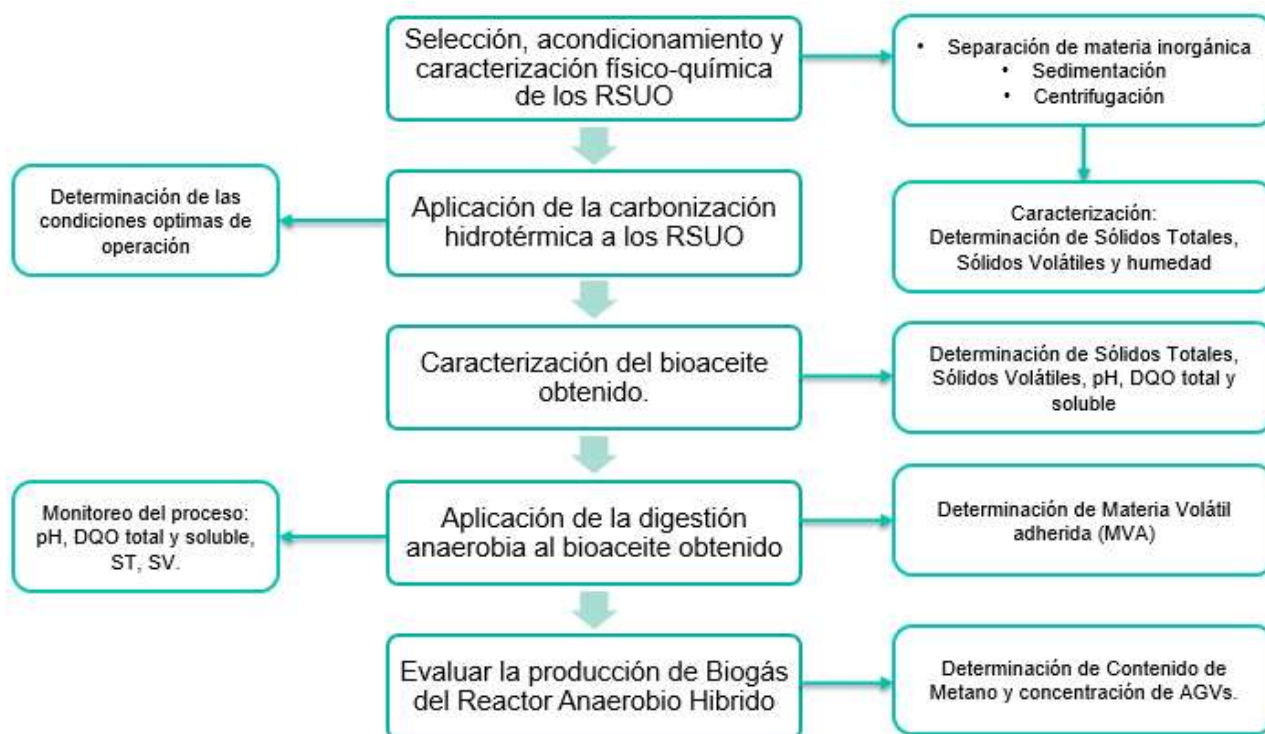


Figura 2.1 Metodología general de la presente investigación.

## **2.1 Caracterización fisicoquímica de los RSUO**

### **2.1.1. Obtención de la materia prima**

La ciudad de Orizaba Veracruz cuenta con una planta separadora de Residuos Sólidos Urbanos llamada Ecori la cual se muestra en la Figura 2.2, de la cual se obtuvo la materia prima para la presente investigación, seleccionándose los RSU orgánicos que llegan a esa planta.

El muestreo fue supervisado por personal de la planta de separación y el autor de la presente tesis y consistió en seleccionar aleatoriamente los RSUO una vez por semana los días que se llevaba a cabo la recolección de los residuos orgánicos en la ciudad; con palas y cubetas de 20 L de capacidad y después fueron transportados a la planta piloto del Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba para el acondicionamiento de los RSUO.



Figura 2.2 Planta Ecori de Separación de RSU.

### **2.1.2 Acondicionamiento de la materia prima (RSUO).**

Una vez que fueron transportados los RSUO a la planta piloto, se realizó la separación manual para eliminar algunos residuos inorgánicos grandes, ya que éstos pueden afectar considerablemente la carbonización hidrotérmica, ya que no alcanzan a ser incinerados a las temperaturas que se trabajó. Posteriormente se

agregó la misma cantidad en litros de agua y se dejó sedimentar para tener una mejor separación de los residuos que no pertenecían al grupo de los orgánicos. Una vez realizada la sedimentación se transportó la materia prima a una centrifuga (Figura 2.3) para separar la parte liquida de los residuos y se reservó la parte sólida para ser nuevamente lavada para su procesamiento.



Figura 2.3 Centrífuga semi-industrial.

### 2.1.3 Determinaciones realizadas a los RSUO.

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de los RSUO, en la Tabla 2.1 se muestran las pruebas realizadas y los métodos de prueba utilizados.

Tabla 2.1 Parámetros fisicoquímicos.

| Análisis | Unidades | Método de prueba                                                 |
|----------|----------|------------------------------------------------------------------|
| ST y STV | g/L      | NMX-AA-034-SCFI-2001                                             |
| pH       | ---      | Método potenciométrico 4500-H <sup>+</sup> B de Standard Methods |
| Humedad  | %        | NOM-116-SSA1-1994                                                |

## 2.2 Aplicación de la carbonización hidrotérmica

### 2.2.1 Descripción del reactor

Como se ha comentado con anterioridad, el proceso de HTC es un proceso en el cual la materia orgánica se transforma en presencia de agua bajo la influencia de la temperatura. Para la realización del proceso de HTC a escala de laboratorio se recurre al uso de un reactor de acero inoxidable de alta presión modelo CF-1 como el que se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.4 Reactor para HTC.

El vaso del reactor posee una capacidad de 1 L. El cierre hermético se garantiza con una junta de teflón en forma de anillo plano. La junta de teflón es presionada entre la tapa y el vaso y fijado por ocho tornillos.

La presión se controla por manómetro de 6 MPa, el reactor cuenta también con tres válvulas de salida ubicadas en la tapa del mismo. Para calentar el reactor cuenta con una chaqueta calefactora y la lectura de la temperatura se realiza por medio de un termopar ubicado de forma vertical en la tapa del reactor. Para la temperatura interna se monitorea con un termopar situado de manera horizontal por la parte lateral del reactor.

Cuenta con un panel que indica el tiempo de operación la temperatura de la chaqueta y la temperatura interna del reactor.

### 2.3 Caracterización del bioaceite obtenido en la CHT

Se llevó a cabo la caracterización de la fracción líquida que se obtuvo previamente de la carbonización. Las determinaciones fisicoquímicas realizadas se mencionan a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Caracterización fisicoquímica del bioaceite.

| <b>Análisis</b>                     | <b>Unidades</b> | <b>Método de prueba</b>                                          |
|-------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>s</sub> | g/L             | Método colorimétrico 5220 D Standard Methods                     |
| ST y STV                            | g/L             | NMX-AA-034-SCFI-2001                                             |
| pH                                  | ---             | Método potenciométrico 4500-H <sup>+</sup> B de Standard Methods |

### 2.4 Aplicación de la digestión anaerobia al bioaceite obtenido

#### 2.4.1 Descripción del reactor

El equipo utilizado fue un Reactor Anaerobio Híbrido (RAH) de lecho fluidizado inverso el cual cuenta con dos secciones, una parte superior de lecho fijo (LF) y la parte inferior de lecho fluidizado inverso (LFI) como se muestra en la Figura 2.8 es llamado inverso ya que la alimentación fue por el lado superior del reactor.



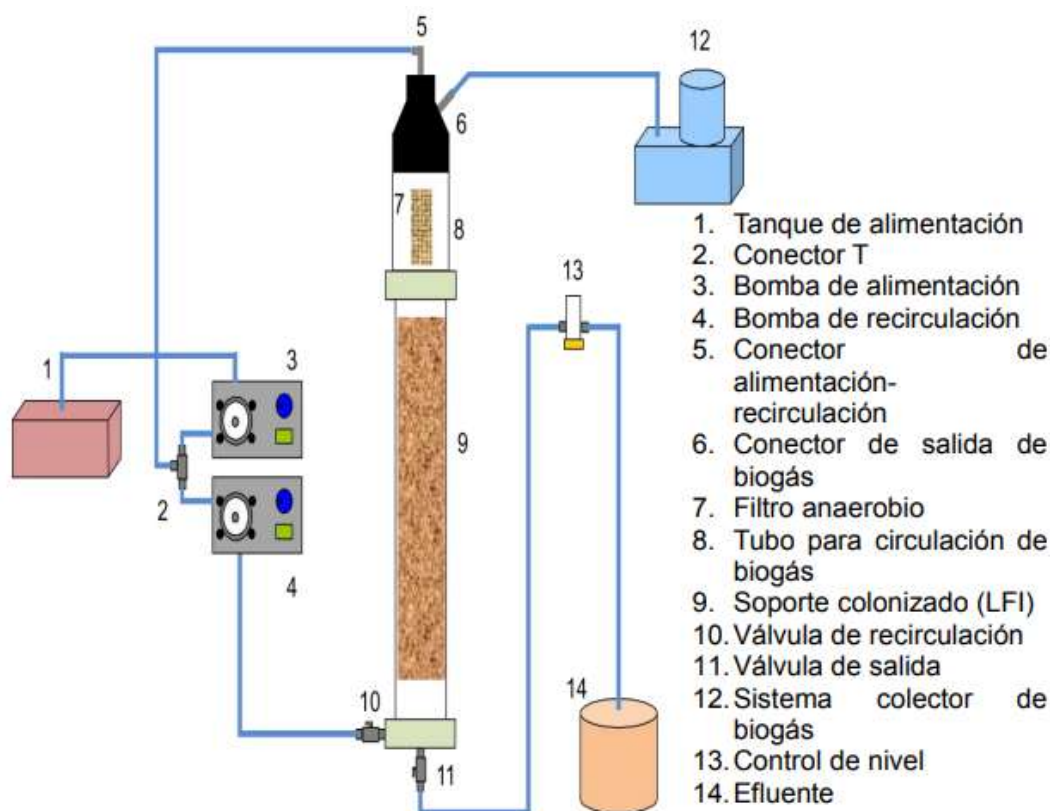


Figura 2.5 Esquema del RHA (González Paz *et al.*, 2015).

El lecho fijo fue de material acrílico de forma cilíndrica con un diámetro de 7.62 cm (3 in) y una longitud de 23 cm, en su interior se encontraban anillos poliméricos cubiertos por esmalte acrílico como medio de soporte. El lecho fluidizado fue elaborado de material acrílico con un diámetro de 8.89 cm (3.5 in) y una longitud de 80 cm, como medio de soporte se utilizó Extendsphere, una arena sílica con una densidad de  $0.69 \text{ kg/m}^3$ . La cámara de biogás del lecho fluidizado fue igualmente de material acrílico de forma cilíndrica, la cual recubría al lecho fijo con la finalidad de crear un desplazamiento gas-líquido.

Se utilizaron dos bombas peristálticas marca Masterflex/Cole-Parmer, una para la alimentación y otra para la recirculación. Las válvulas, conectores y mangueras utilizadas fueron de la marca Parker Store.

### 2.4.2 Sustratos utilizados



Figura 2.6 Almacenamiento del bioaceite.

Para la etapa de arranque y estabilización se utilizó un sustrato proveniente de la mezcla de frutas y verduras del mercado Zapata de la ciudad de Orizaba Veracruz estos residuos fueron cortados y triturados para obtener la fracción líquida la cual fue hidrolizada por un reactor escala piloto. En la etapa estable se utilizó el bioaceite (Figura 2.6) obtenido previamente en la primera etapa de la presente investigación el cual fue obtenido de la carbonización de RSUO provenientes de la planta de separación ECORI ubicada en la ciudad de Orizaba Veracruz, estos sustratos fueron caracterizados como se muestra en la tabla 2.3 y fueron almacenados a una temperatura de 4°C en matraces Erlenmeyer de 250 ml cerrados para preservar mejor sus propiedades.

Tabla 2.3 Caracterización de los sustratos utilizados.

| <b>Análisis</b>                     | <b>Unidades</b> | <b>Método de prueba</b>                                              |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|
| DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>s</sub> | g/L             | Método colorimétrico 5220 D<br>Standard Methods                      |
| ST y STV                            | g/L             | NMX-AA-034-SCFI-2001                                                 |
| pH                                  | ---             | Método potenciométrico 4500-<br>H <sup>+</sup> B de Standard Methods |

### 2.4.3 Etapa de inoculación arranque y estabilización del RAH

La etapa de arranque constó de 60 días en los cuales se desarmó el reactor, se limpió y se volvió a armar por completo, esto con el propósito de revisar que estuvieran en buenas condiciones los aditamentos y evitar fugas posteriores. Para la inoculación se utilizaron 800 mL de soporte exthendosphere colonizado de un efluente de frutas y verduras para inocular 700 mL de exthendosphere nuevo el cual se ubicó en el LFI y para el LF la inoculación ocurrió de manera natural mientras se operaba el reactor. Después de la inoculación el reactor se mantuvo en recirculación por una semana para observar fugas o desperfectos en el armado y el correcto funcionamiento del mismo.

Para el arranque del reactor se utilizó el efluente de frutas y verduras y fue alimentado en modo continuo durante 33 días y debido a su pH ácido fue ajustado con NaOH a la entrada y se mantuvo una Cva de 5 gDQO/Ld.

Después de 33 días el RAH alcanzó la estabilización y se procedió a realizar el cambio de sustrato del efluente de RSUO al Bioaceite, con una Cva de 5 gDQO/Ld y controlando el PH de entrada entre 6.8 y 7.2 se operó en condiciones mesófilas de 35 °C.

## 2.5 Monitoreo del proceso modo continuo del RAH

Durante la operación en modo continuo se realizaron pruebas fisicoquímicas para controlar y monitorear el proceso de la DA los cuales se presentan en la tabla 2.4 y se describen posteriormente.

Tabla 2.4 Parámetros de monitoreo del RAH.

| <b>Análisis</b>                     | <b>Unidades</b> | <b>Método de prueba</b>                                              |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|
| DQO <sub>T</sub> y DQO <sub>s</sub> | g/L             | Método colorimétrico 5220 D<br>Standard Methods                      |
| ST y STV                            | g/L             | NMX-AA-034-SCFI-2001                                                 |
| pH                                  | ---             | Método potenciométrico 4500-<br>H <sup>+</sup> B de Standard Methods |

La determinación de pH se realizó con el potenciómetro marca OAKTON modelo pH 700, el cual se calibra con solución tampón de pH 4.0, 7.0 y 10.0, siguiendo el método Potenciométrico 4500-H<sup>+</sup> B Standard Methods.

Los ST se determinaron de acuerdo al método gravimétrico (APHA, 2017) tomando 5 mL de muestra y se colocaron en una estufa Riossa a 105 °C durante 24 horas. Para los SSV la muestra se calcinó en una mufla marca MARLA a 550 °C por 2 horas. Las muestras se pesaron en una balanza digital Ohaus Adventurer.

La DQO total y soluble se determinó por el método colorimétrico (APHA, 2017). Se determinó la DQO<sub>T</sub> y DQO<sub>s</sub> a la entrada y salida del reactor para así evaluar la remoción de materia orgánica.

## **2.6 Evaluación de la producción del biogás obtenido**

Para evaluar la producción del Biogás que se obtuvo durante la DA se realizó la prueba de contenido de metano, ya que éste es el principal componente del biogás y también puede ser aprovechado para la obtención de Biometano. Se realizó mediante cromatografía de gases con un cromatógrafo de marca Buck modelo 310 el cual está compuesto por una columna capilar de All Tech CRT-I, la cual utiliza Helio como gas de arrastre a presión de 70 psi y temperatura de 36 °C. La temperatura del detector es de 121 °C y la dosis de inyección es de 2mL.

# **CAPÍTULO 3**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la experimentación de la presente investigación de acuerdo con la metodología planteada en el capítulo anterior.

#### 3.1 Caracterización fisicoquímica de los RSUO

Los RSUO fueron recolectados en la planta de separación cada quince días y fueron transportados a la planta piloto del Tecnológico Nacional campus Orizaba, donde fueron acondicionados y posteriormente caracterizados, los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 3.1 por lotes, fueron utilizados 5 lotes diferentes para su carbonización a diferentes temperaturas y tiempo para finalmente utilizar la fracción líquida resultante llamada bioaceite como sustrato para la DA. Se pueden observar altos contenidos de humedad del 56.23 a 67.68 % lo cual favorece la producción de bioaceite, sin embargo, éstos presentan una humedad menor si se compara con residuos similares (Tabla 3.2) ya que al pasar por un proceso de recolección y traslado pueden secarse y un pH ácido similar al obtenido en investigaciones anteriores (Tabla 3.2) para este tipo de residuos estudiados, sin embargo He *et al.* (2015), descubrieron que el contenido alto de humedad afecta a los procesos de hidrólisis y descarboxilación en la CHT. La Figura 3.1 muestra el aspecto de los RSUO antes de la carbonización.

Tabla 3.1 Caracterización de RSUO.

|        | pH   | Humedad (%)  | ST (% m/m)   | SV (%m/m)    | Cenizas (%)  |
|--------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Lote 1 | 5.9  | 62.59 ± 5.99 | 37.40 ± 5.99 | 52.84 ± 7.71 | 47.15 ± 7.71 |
| Lote 2 | 5.33 | 56.23 ± 1.48 | 43.76 ± 1.48 | 50.72 ± 4.30 | 49.27 ± 4.30 |
| Lote 3 | 5.78 | 59.01 ± 0.75 | 40.98 ± 0.75 | 46.52 ± 2.33 | 53.47 ± 2.33 |
| Lote 4 | 5.81 | 67.68 ± 6.76 | 32.31 ± 6.76 | 46.85 ± 3.59 | 53.14 ± 3.59 |
| Lote 5 | 6.35 | 56.14 ± 2.72 | 43.86 ± 2.72 | 47.17 ± 4.35 | 52.82 ± 4.35 |

En cuanto al contenido de cenizas se observan altos porcentajes del 47.15 % hasta 53.47 % lo que indica un alto contenido de materia inorgánica presente en los RSUO

debido principalmente a que estos residuos no llegan a ser separados en orgánicos e inorgánicos en su totalidad, lo cual puede presentar una desventaja a la hora de aplicar la CHT ya que este proceso se caracteriza por utilizar temperaturas relativamente bajas para carbonizar los residuos orgánicos.

Tabla 3.2 Comparación de resultados con otras investigaciones.

| Parámetro          | Presente Investigación | Hernández-Nazario <i>et al.</i> , (2018) | Lloréns <i>et al.</i> , (2007) |
|--------------------|------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>ST (%)</b>      | 6.48                   | 32.3                                     | NE                             |
| <b>SV (%)</b>      | 48.83                  | 79.1                                     | 94.6                           |
| <b>PH</b>          | 5.83                   | 6.9                                      | NE                             |
| <b>Humedad (%)</b> | 60.32                  | 67.7                                     | 74.5                           |



Figura 3.1 RSUO crudo.

### 3.2 Aplicación de la Carbonización Hidrotérmica

Para la parte de la CHT se utilizaron diferentes temperaturas (180 °C, 190 °C, 200 °C y 210 °C) y tiempos (1, 2 y 3 horas), ya que estas son variables que influyen en los productos que se obtienen a partir de este tratamiento. Cada corrida se realizó por duplicado los resultados promedio se muestran en la Tabla 3.3 donde se puede observar que al ingresar 350 gramos de RSUO al reactor y 350 gramos de agua se obtenían resultados similares entre 160 hasta 195 gramos de hidrochar y de 243 hasta 415 ml de bioaceite. La literatura menciona (Czerwińska *et al.*, 2022) que a temperaturas más altas se obtiene menor cantidad de hidrochar, pero con una calor



específico mayor, en este caso no se observan grandes diferencias ya que se utilizaron cinco lotes de materia prima cada una de ellas con una humedad diferente de entre 56.1 y 67.6 %y diferente composición lo que tiene mayor influencia en la cantidad de los productos obtenidos que las condiciones de reacción.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos en la CHT.

| Condiciones      |            | Hidrochar       |               | Bioaceite |     |                 | Biogás |                        |
|------------------|------------|-----------------|---------------|-----------|-----|-----------------|--------|------------------------|
| Temperatura (°C) | Tiempo (h) | Peso Húmedo (g) | Peso Seco (g) | mL        | g   | Densidad (g/mL) | L      | Presión generada (Mpa) |
| 180              | 1          | 180             | 99            | 331       | 336 | 1.01            | 2.72   | 0.85                   |
| 180              | 2          | 189             | 115           | 378       | 354 | 0.93            | 3.00   | 0.95                   |
| 180              | 3          | 172             | 135           | 406       | 409 | 1.01            | 3.60   | 1.00                   |
| 190              | 1          | 164             | 104           | 419       | 428 | 1.02            | 3.65   | 1.20                   |
| 190              | 2          | 160             | 149           | 336       | 336 | 1.00            | 4.65   | 1.23                   |
| 190              | 3          | 195             | 124           | 378       | 384 | 1.02            | 4.24   | 1.25                   |
| 200              | 1          | 172             | 108           | 383       | 391 | 1.02            | 5.04   | 1.55                   |
| 200              | 2          | 162             | 106           | 415       | 422 | 1.02            | 4.45   | 1.63                   |
| 200              | 3          | 179             | 112           | 343       | 379 | 1.1             | 5.22   | 1.60                   |
| 210              | 1          | 189             | 110           | 373       | 374 | 1.00            | 5.10   | 1.90                   |
| 210              | 2          | 162             | 133           | 243       | 243 | 1.00            | 3.92   | 1.93                   |
| 210              | 3          | 193             | 114           | 357       | 360 | 1.01            | 5.95   | 1.93                   |

De acuerdo a las condiciones de operación se determinó el rendimiento en cuanto a la producción de bioaceite, los resultados se muestran en la tabla 3.4 en la cual se puede observar que el mejor rendimiento fue de 190 °C a una hora, ya que en esta corrida se obtuvo mayor volumen de bioaceite lo cual coincide con la literatura, la cual menciona que las bajas temperaturas presentan una mejor eficiencia en el proceso (Czerwińska *et al.*, 2022). Se observa también que a medida que aumentan la temperatura y el tiempo de residencia los rendimientos bajan, lo cual es normal dentro del proceso de la CHT (Merzari *et al.*, 2020).

Tabla 3.4 Rendimiento porcentual del bioaceite.

| Tiempo (h) | Temperatura (°C) |      |      |      |
|------------|------------------|------|------|------|
|            | 180              | 190  | 200  | 210  |
| 1          | 47.9             | 61.1 | 55.9 | 53.4 |
| 2          | 50.5             | 47.9 | 60.2 | 34.3 |
| 3          | 58.4             | 54.8 | 54.1 | 51.4 |

### 3.3 Caracterización del bioaceite obtenido en la CHT

Una vez realizadas las carbonizaciones a las diferentes condiciones, se hizo la separación de los subproductos, la parte sólida se reservó y la parte líquida conocida como bioaceite se caracterizó para ser utilizado posteriormente en la DA como sustrato, los resultados promedio se muestran en la Tabla 3.5 donde se puede observar que cuenta con alta carga orgánica al obtenerse 33.49 g/L y 49.53 g/L para la DQO<sub>S</sub> y DQO<sub>T</sub> respectivamente, gracias a esto se puede suponer que es un buen candidato a sustrato para la digestión anaerobia (Houbron *et al.*, 2016). Presenta un pH ácido lo cual es similar a lo obtenido por Parra-Orobio *et al.* 2014, en el cual caracterizaron Biorresiduos de origen municipal y obtuvieron valores entre 5.5 y 8.0 unidades.

Tabla 3.5 Resultados promedio de la caracterización del bioaceite.

| Parámetro | Unidades | Bioaceite |
|-----------|----------|-----------|
| ST (g/g)  | (g/L)    | 44.39     |
| SV (g/g)  | (g/L)    | 28.05     |
| pH        | —        | 5.34      |
| DQOS      | (g/L)    | 33.49     |
| DQOT      | (g/L)    | 49.53     |

#### 3.3.1 Demanda química de oxígeno en bioaceite

En la Figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la materia orgánica que contenía el bioaceite, la cual fue medida mediante la DQO<sub>T</sub> ya que en investigaciones anteriores (Ariza-Calvo *et al.*, 2019) se han obtenido valores similares para luego utilizarlos como sustrato de la digestión anaerobia para la

producción de biogás. Se puede observar que los valores más altos se obtuvieron a las condiciones de temperatura y tiempo más bajas, lo cual coincide con Cao *et al.*, 2020. La mayor concentración fue de 57.76 g/L en condiciones de 180 °C a 1 hora y al aumentar la severidad de la CHT estos valores fueron disminuyendo, obteniéndose las concentraciones más bajas para los bioaceites obtenidos en los tiempos de residencia de 3 horas con la concentración más baja de 36.11 g/L a una temperatura de 200 °C.

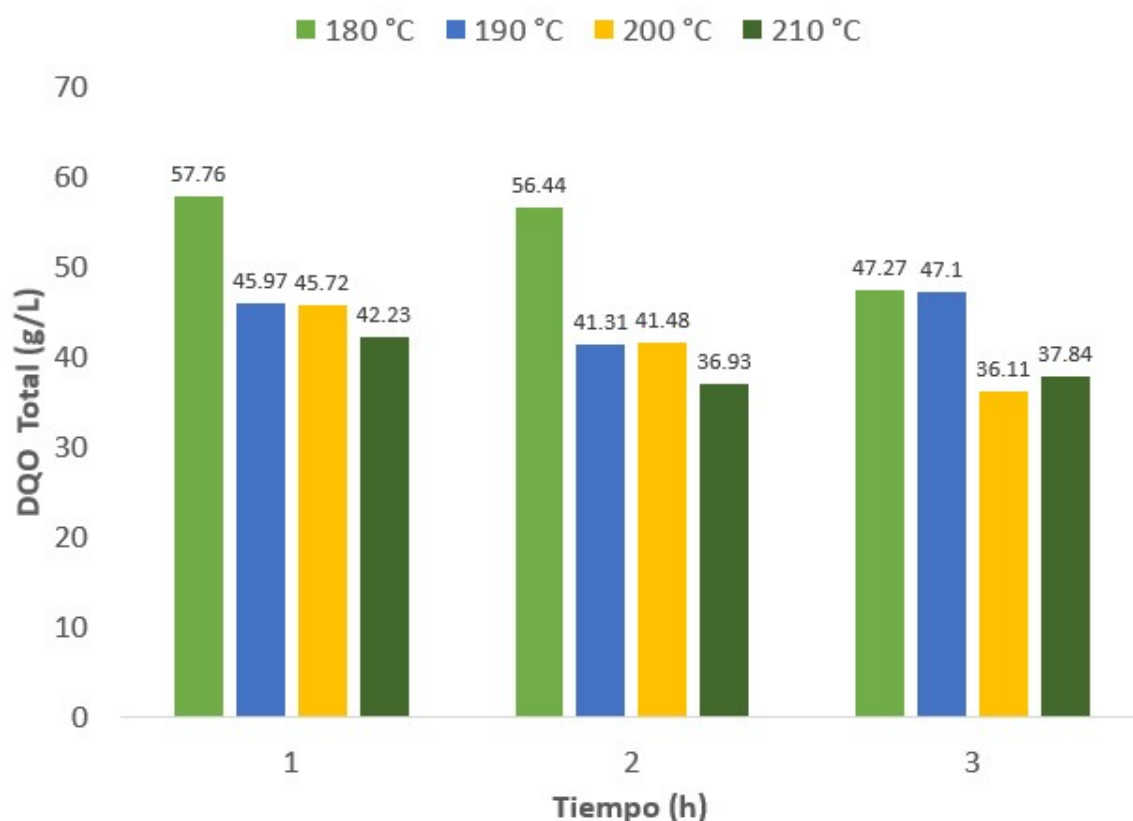


Figura 3.2 DQO<sub>T</sub> contenida en el bioaceite a las diferentes condiciones.

La Figura 3.3 muestra los resultados obtenidos en la caracterización de DQOs. Se observa la misma tendencia que en el caso de la DQO<sub>T</sub> ya que bioaceite más concentrado fue de 38.29 g/L a las condiciones de 180 °C a 1 hora.

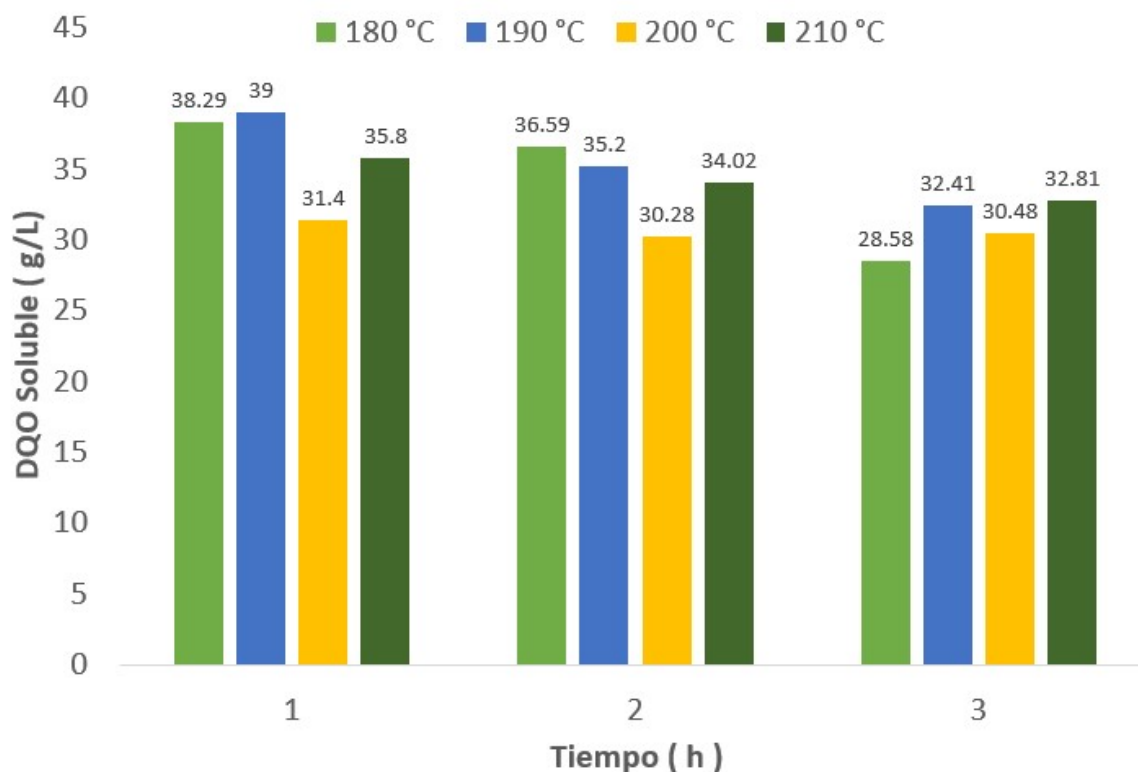


Figura 3.3 DQOs contenida en el bioaceite a diferentes condiciones.

### 3.3.2 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles en Bioaceite

Como parte de la caracterización se determinaron Solidos Totales y Solidos volátiles, con el fin de observar el contenido de materia orgánica en el bioaceite.

La Figura 3.4 muestra los resultados de cada bioaceite obtenido, donde se aprecia como el contenido de ST aumenta proporcionalmente con el tiempo y la temperatura utilizada en la CHT obteniendo valores de 35.68 g/L (190 °C a 1 hora) hasta 56.04 g/L (210 °C 3 horas).

En la Figura 3.5 se muestran los resultados de la caracterización de Sólidos Volátiles los cuales indican la cantidad de materia orgánica contenida en el bioaceite, se puede observar que las mejores condiciones para obtener un bajo contenido de SV en las severidades más bajas, en este caso se obtuvo en contenido de 23.36 g/L en las condiciones de 1 hora a 190 °C.

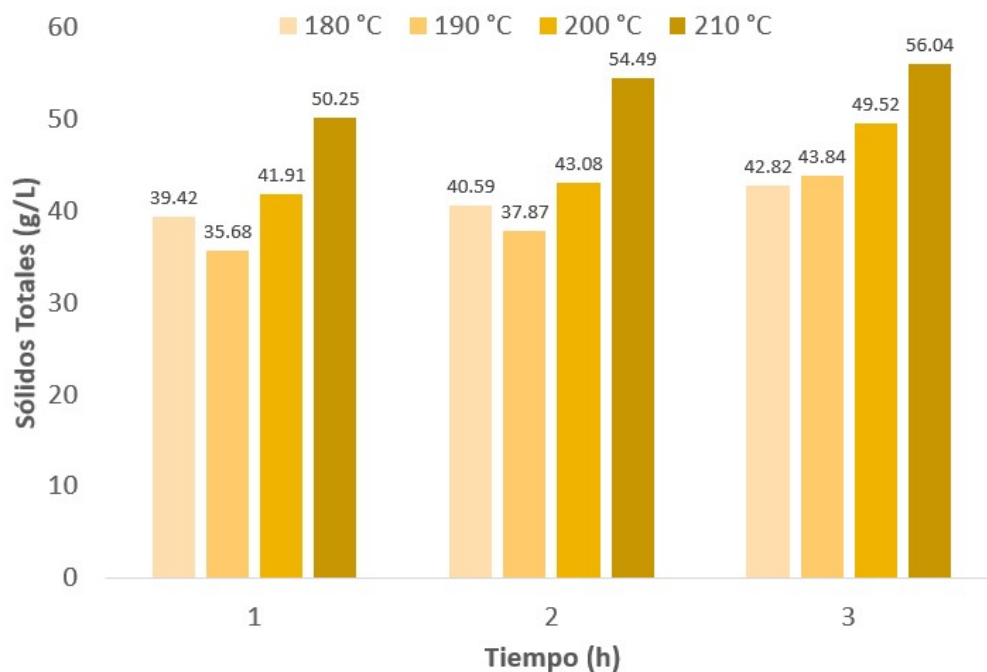


Figura 3.4 Contenido de Sólidos Totales en el bioaceite.

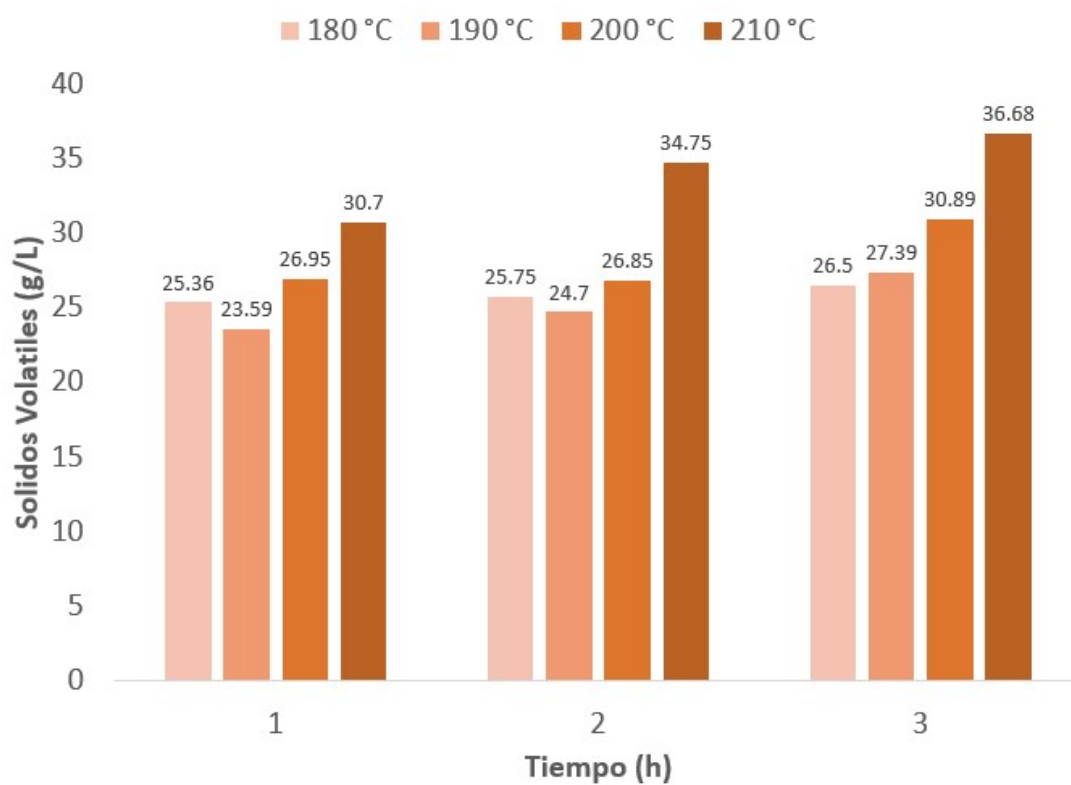


Figura 3.5 Contenido de Sólidos Volátiles en el bioaceite.

### 3.3.3 pH del bioaceite a diferentes condiciones

Otro parámetro fisicoquímico evaluado en la caracterización del bioaceite fue el pH. El proceso de la CHT favorece a los ambientes neutros y ligeramente ácidos (Czerwińska *et al.*, 2022), sin embargo, los resultados obtenidos muestran (Figura 3.6) un pH ácido lo cual se debe a la naturaleza de la biomasa donde fue obtenido, en este caso los RSUO. Se aprecia un ligero aumento en el pH proporcional al aumento de la temperatura de la CHT y se encuentra en un rango de 4.83 a 5.9 lo cual coincide con lo obtenido por Lucian *et al.*, (2018) quienes observaron que el bioaceite se volvía más ácido en temperaturas de hasta 180 °C y era más básico en temperaturas superiores a 180 °C lo cual se debía a la repolimerización de los ácidos orgánicos formados a temperaturas y tiempos de residencia más elevados.

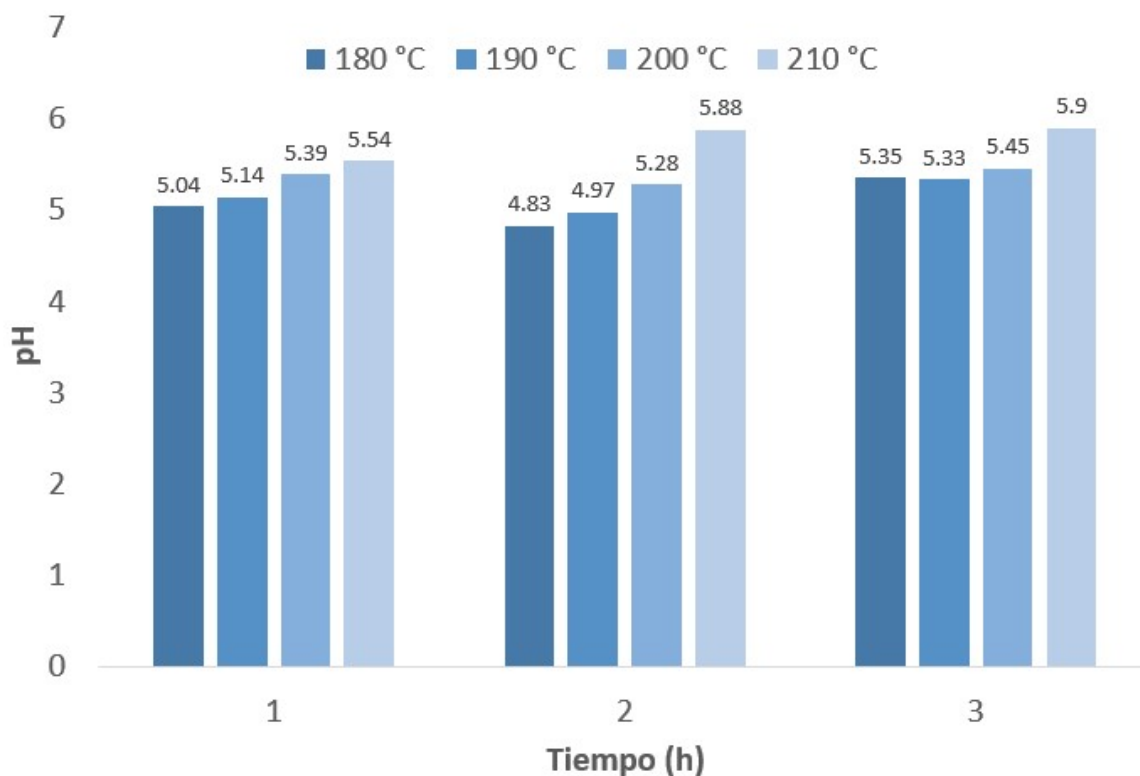


Figura 3.6 pH del bioaceite obtenido a diferentes condiciones.

### 3.4 Aplicación de la Digestión Anaerobia al bioaceite obtenido

La segunda fase de la presente investigación consistió, como ya se ha mencionado con anterioridad, en utilizar el bioaceite como sustrato para alimentar un reactor anaerobio híbrido de biopelícula y poder evaluar así la producción de biogás y su contenido de metano a las diferentes severidades a las cuales se obtuvo el bioaceite.

#### 3.4.1 Arranque de Reactor anaerobio híbrido

La etapa de arranque y estabilización se llevó a cabo con un efluente de frutas y verduras, la Cva utilizada fue de 5 gDQO/Ld, con un tiempo de residencia hidráulica del sustrato fue de 16 horas y el caudal de alimentación fue de 3.6 L diarios. Después de 33 días se procedió a hacer el cambio de sustrato por el bioaceite, de acuerdo con la bibliografía consultada, los mejores rendimientos de metano se obtienen cuando el bioaceite es obtenido en bajas severidades, por este motivo se alimentó con el bioaceite obtenido en la carbonización de 180° C a una hora, durante 20 días más para estabilizar el RAH, se utilizaron las mismas condiciones de operación que con el efluente de frutas y verduras. La Figura 3.7 muestra las condiciones iniciales en las que se encontró el reactor vs cuando el reactor ya estaba armado y listo para empezar a utilizarse.



Figura 3.7 Condiciones iniciales del RAH

De acuerdo con Boe *et al.* (2010), el monitoreo y control pueden ser las principales estrategias para la estabilización del proceso y por tanto la eficiente conversión del sustrato en la digestión anaerobia. En la Tabla 3.6 se observan las condiciones de operación a detalle utilizadas para el monitoreo del RAH.

Tabla 3.6 Parámetros de alimentación del RAH.

| Sustrato                  | Fracción líquida de frutas y verduras |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Temperatura               | 35 °C                                 |
| pH                        | 6.8 - 7.2                             |
| Cva                       | 5 gDQO/Ld                             |
| TRH                       | 16 h                                  |
| Volumen de alimentación   | 1.6 L                                 |
| Velocidad de alimentación | 1.1 mL/min                            |

Los resultados obtenidos en la etapa de estabilización se muestran a continuación:

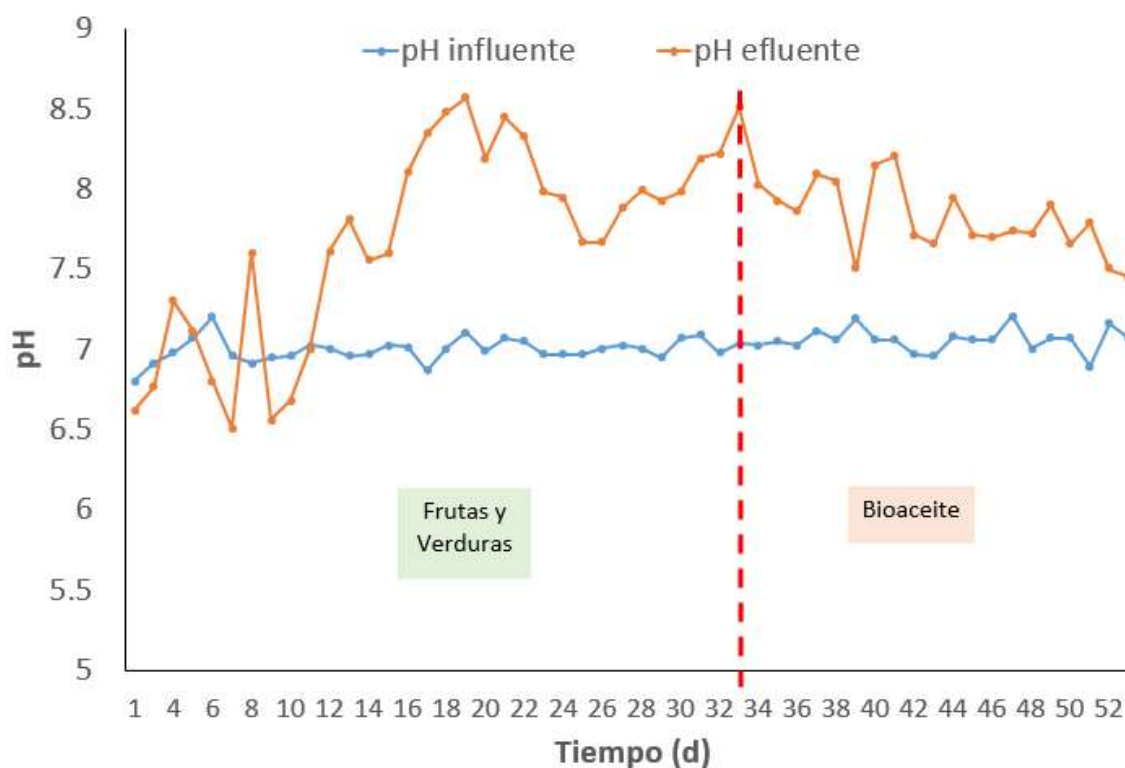


Figura 3.7 Monitoreo de pH en la etapa de estabilización.



El pH es un parámetro importante dentro de la operación del reactor ya que éste debe mantenerse en un medio neutro, por esta razón el pH fue ajustado a la entrada del reactor (pH afluente) y monitoreado a su salida (pH efluente). En la Figura 3.7 se observan los resultados obtenidos y se puede apreciar que los primeros días el pH era inestable los primeros 11 días, y después empezó a alcalinizarse en un rango de 7.5 a 8.5, pero al realizar el cambio de sustrato, el pH fue estabilizándose hasta alcanzar un valor de 7.4 en el día 53 de la operación. El monitoreo fue importante para evitar que el pH no disminuyera porque los niveles bajos de pH pudieran causar inhibición bacteriana.

La producción de biogás también fue monitoreada diariamente, los resultados se muestran en la Figura 3.8 donde se observa que el día uno solo se produjo 0.5 L de biogás y la producción fue aumentando al paso de los días hasta llegar a 8.5 L diarios en el día 33, al realizar el cambio de sustrato, la producción bajó nuevamente a 2 L diarios lo cual es normal debido al cambio que sufrió el reactor, pero fue aumentando nuevamente hasta producir 9 L diarios de biogás.

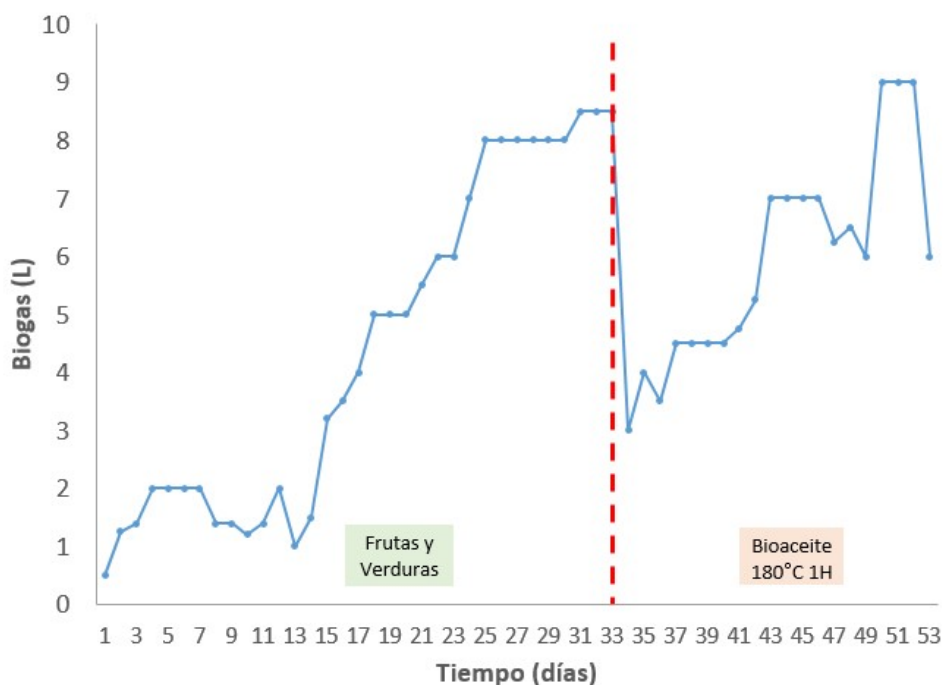


Figura 3.8 Producción de biogás etapa de estabilización.

En la Figura 3.9 se muestran las remociones de ST y SV, los primeros días no hubo remociones por parte del reactor, lo cual es normal al encontrarse en la etapa de arranque, pero a partir del día 6 se presentaron las primeras remociones del 4.59 % en los ST y 11.35 % en SV y se puede observar que alcanzaron remociones de hasta el 55.9 % (día 28) y 90.19 % (día 23) con el sustrato de frutas y verduras, al hacer el cambio de sustrato no se observa una diferencia significativa, y se lograron remociones de hasta el 67.55 % (día 45) en ST y 81.72 % (día 34) en SV, estos valores son similares a lo obtenido en investigaciones anteriores (Juarez-Garcia *et al.*, 2022) donde se utilizó la fracción líquida de RSU como sustrato, en un RAH y una Cva de 5 gDQO/Ld.

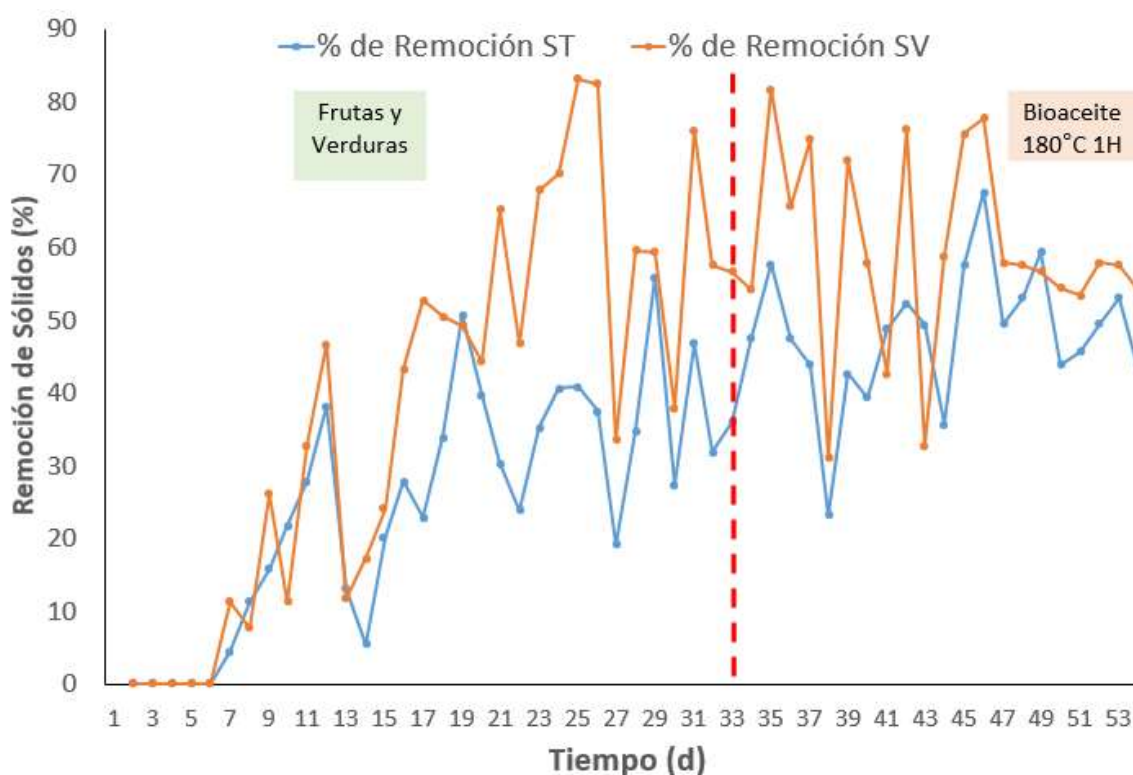


Figura 3.9 Remoción de sólidos totales y volátiles.

Uno de los parámetros para evaluar el rendimiento del RAH es mediante las remociones que éste logra en cuanto a  $DQO_T$  y  $DQO_s$ . La Figura 3.10 muestra las

remociones obtenidas a lo largo de los días, se puede observar que los primeros días el reactor no lograba grandes remociones pero al paso de los días estas fueron incrementando hasta realizar el cambio de sustrato por el bioaceite, a partir del día 48 se lograron remociones por arriba del 95 % obteniendo remociones de hasta el 96.86 % en  $DQO_T$  y del 97.7 % en  $DQO_s$  lo que indica que el reactor se encontraba ya estabilizado para realizar la evaluación con los distintos bioaceites obtenidos anteriormente, estos resultados coinciden con lo obtenido por Juárez-García *et al.*, 2022 quienes evaluaron el rendimiento de un RAH utilizando la fracción líquida de RSU obteniendo un 96.10% de eliminación de  $DQO_T$  y un 98.50% de eliminación de  $DQO_s$  demostrando que los RAH pueden mantener altos niveles de eliminación de  $DQO$ .

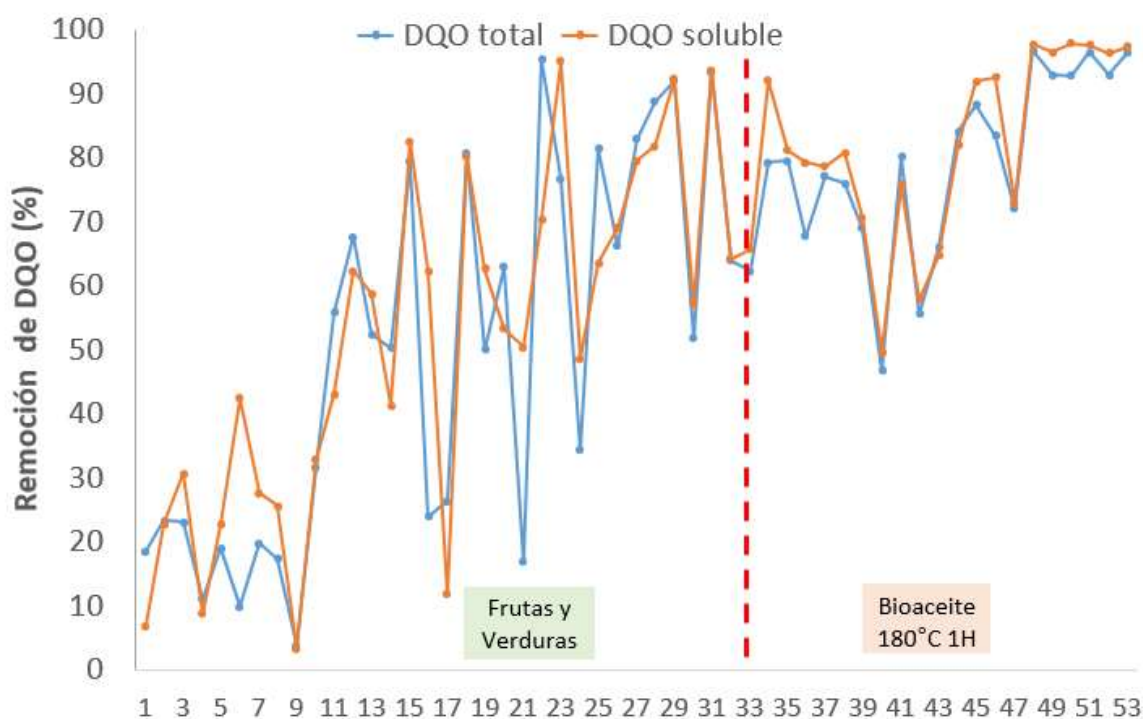


Figura 3.10 Remociones de  $DQO$  total y soluble en el RAH.

### 3.5 Monitoreo del proceso modo continuo del RHA

Una vez estabilizado el RAH se procedió a alimentar con los bioaceites obtenidos a diferentes condiciones con una Cva de 5 gDQO/Ld un TRH de 16 horas y se mantuvo así durante 30 días para evaluar el biogás obtenido. A continuación, en la Tabla 3.7 se enlistan las muestras utilizadas durante los 30 días de operación en modo continuo del RHA, los días varían de acuerdo al bioaceite disponible obtenido con anterioridad.

Tabla 3.7 Relación del bioaceite alimentado diariamente,

| Día de operación | Muestra utilizada | Día de operación | Muestra utilizada |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 54               | 180 °C 1H         | 69               | 190° C 3H         |
| 55               | 180 °C 1H         | 70               | 190° C 3H         |
| 56               | 180 °C 1H         | 71               | 200° C 1H         |
| 57               | 180 °C 1H         | 72               | 200° C 1H         |
| 58               | 180 °C 1H         | 73               | 200° C 2H         |
| 59               | 180 °C 2H         | 74               | 200° C 2H         |
| 60               | 180 °C 2H         | 75               | 200°C 3H          |
| 61               | 180 °C 2H         | 76               | 200° C 3H         |
| 62               | 180 °C 3H         | 77               | 210° C 1H         |
| 63               | 180° C 3H         | 78               | 210°C 1H          |
| 64               | 180 °C 3H         | 79               | 210° C 2H         |
| 65               | 190° C 1H         | 80               | 210° C 2H         |
| 66               | 190°C 1H          | 81               | 210 °C 3H         |
| 67               | 190°C 2H          | 82               | 210 °C 3H         |
| 68               | 190°C 2H          | 83               | 210 °C 3H         |

Los microorganismos anaerobios prefieren un pH neutro para desarrollarse correctamente, aunque se permite cierto rango en el cual no hay afectaciones el cual puede ir de 6 a 8.3 para que no se vea afectada la actividad enzimática de los microorganismos (Reyes Aguilera, 2018). En la Figura 3.11 se muestran los valores obtenidos en cuanto al pH, el cual se neutralizó en un rango de 6.8 a 7.0 con escamas de NaOH ya que el bioaceite, como ya se mencionó anteriormente era de pH ácido, se puede observar que el pH se mantuvo estable, dentro del rango

necesario para el correcto desarrollo de las microorganismos dentro del reactor obteniendo un valor mínimo de 7.59 (día 59) y un valor máximo de 8.26 el día 69 de operación, esto en la tercera etapa de operación, cuando el reactor ya se encontraba estable, ya que el principio, con el sustrato de frutas y verduras el efluente se acidificaba obteniendo valores de hasta 6.5

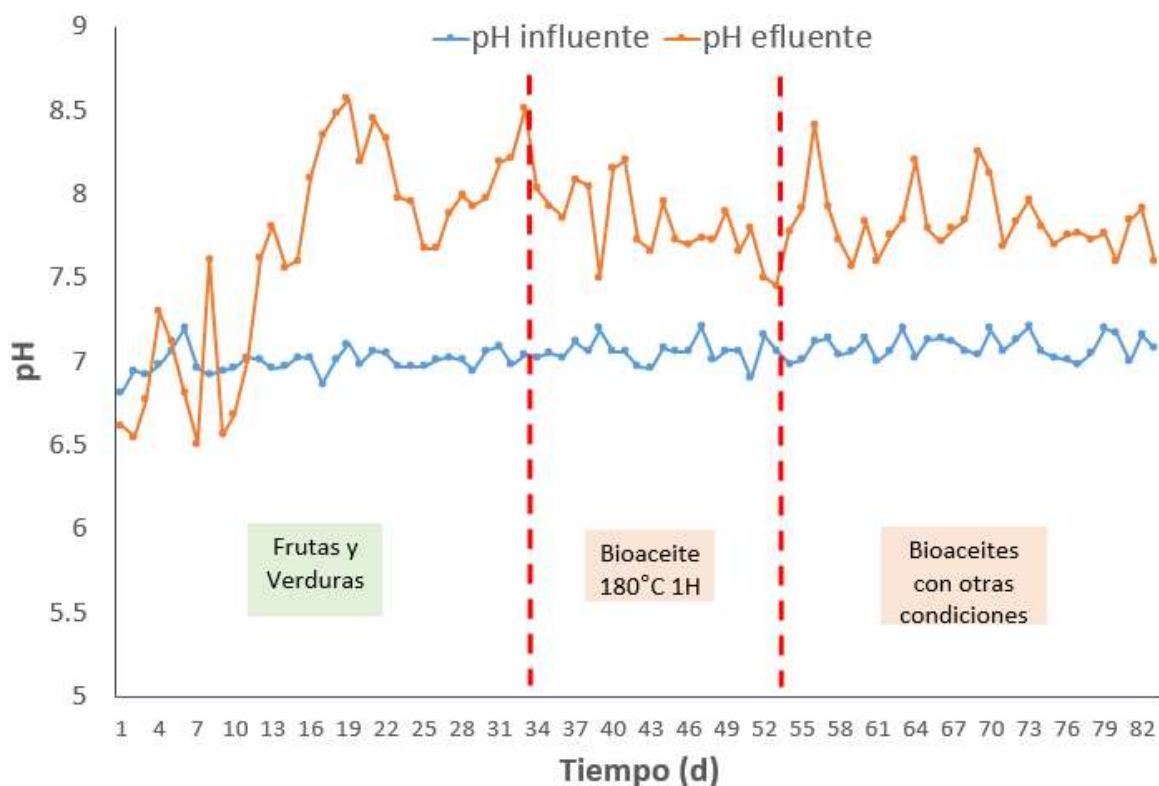


Figura 3.11 Evolución de pH durante la operación del RHA.

La etapa más estable fue la segunda, con el cambio de sustrato por bioaceite ya que se observa estabilidad en el pH del efluente, esto puede deberse a que el RAH ya se encontraba en condiciones óptimas de operación y a que no hubo variación en el sustrato alimentado, como fue el caso de la etapa final. Estos valores se encuentran dentro del rango de 7.0 a 8.3, nivel adecuado para que lo metanógenos crezcan (De la Rubia *et al.*, 2018).

Se evaluó también el porcentaje de remociones en cuanto a ST, los resultados se muestran en la Figura 3.12 donde se puede observar que las mejores remociones se dieron durante la etapa del Bioaceite a 180 °C 1 h ya que a partir del día 46 éstas empezaron a estabilizarse obteniéndose remociones entre 50.9 % y 60.5 % lo cual representa un alto porcentaje de remociones ya que en este tipo de reactores no se tienen grandes eficiencias de remoción de ST sin embargo al hacer el cambio de sustrato por los bioaceites con otras condiciones los porcentajes de remoción bajaron nuevamente, observándose que esto sucedió con los bioaceites obtenidos en las temperaturas más bajas (180 y 190 °C) y al utilizar los bioaceites a altas temperaturas las remociones de ST aumentaron nuevamente obteniéndose remociones de hasta el 70.3 %. Cruz Ramos et al., (2019) obtuvieron resultados similares en las remociones de ST y SV utilizando un RAH observando bajas remociones al inicio de la operación y un incremento al paso de los días hasta lograr remociones mayores al 60 % lo cual mejora la producción de biogás ya que los sólidos son convertidos en biogás.

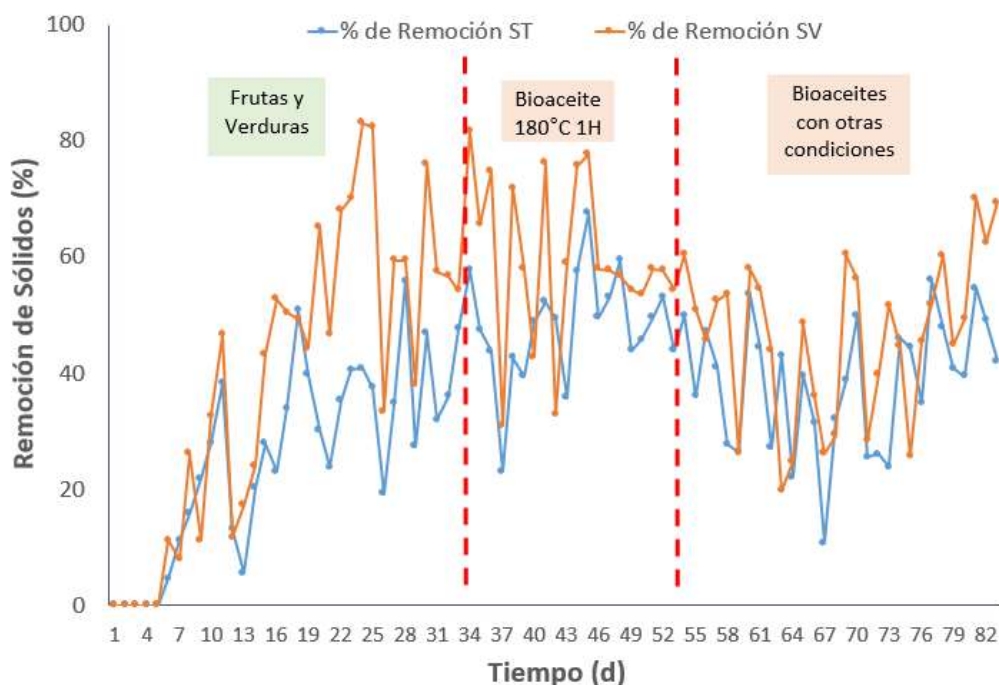


Figura 3.12 Porcentaje de remociones de ST y SV.

La DQO total y soluble fueron monitoreadas y se evaluó el porcentaje de remoción para ambos casos con un TRH de 16 horas y una CVA de 5 gDQO/Ld, los resultados se muestran en la Figura 3.13 donde se observa que la última etapa, cuando el reactor fue alimentado con sustratos producidos a partir de condiciones diferente fue la más estable. Para el caso de la DQO Total las remociones más bajas se dieron en los días 62, 67 y 80, que de acuerdo con la Tabla 3.5 se refieren a días donde se utilizaron sustratos con mayor tiempo de retención en la CHT, es decir a 3h, lo cual puede indicar una tendencia de mayor porcentaje de remociones en bioaceites obtenidos en severidades menores, lo cual coincide con las remociones más altas las cuales fueron en los días 53 y 54 cuando el sustrato alimentado al reactor fue obtenido en condiciones de 180 °C a 1h.

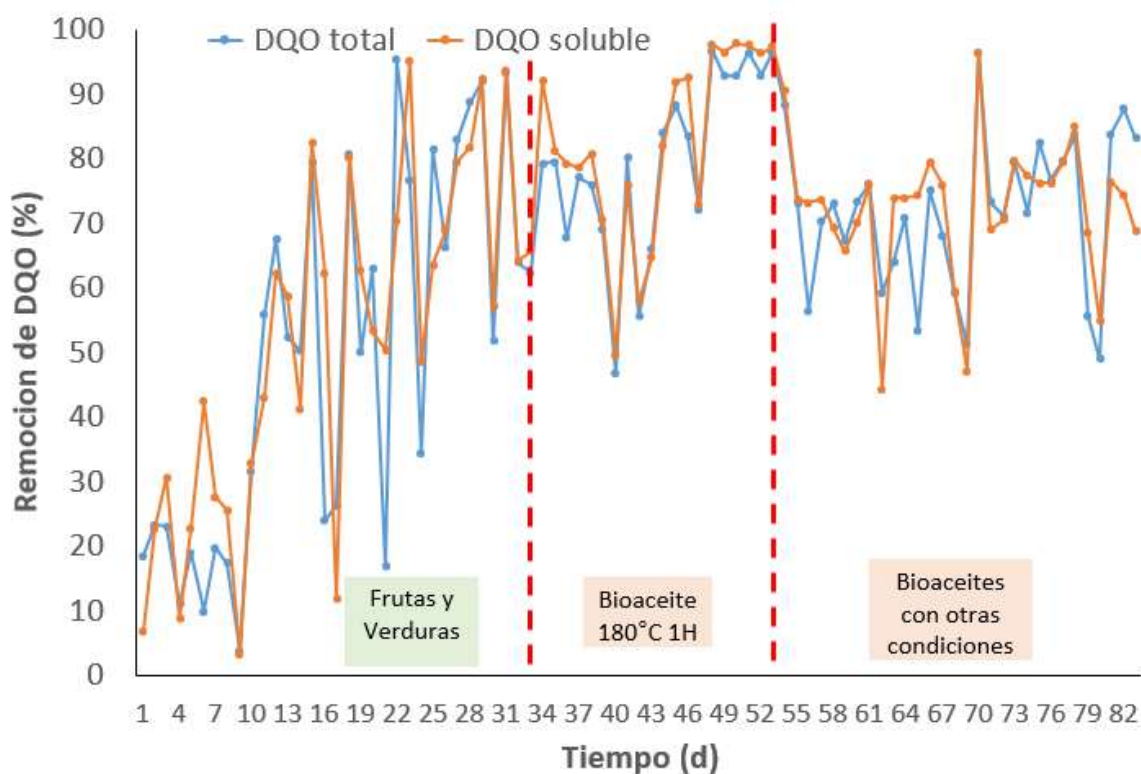


Figura 3.13 Monitoreo de DQO modo continuo.



### 3.6 Evaluación de la producción del Biogás obtenido

#### 3.6.1 Producción de Biogás

La cantidad de Biogás producido fue contabilizada durante los 83 días de operación modo continuo a partir del desplazamiento del líquido, los resultados se observan en la Figura 3.14 donde se puede observar que al paso de los días la producción aumenta y cuando se presenta un cambio de sustrato esta producción baja los primeros días pero sigue una tendencia a producir más biogás conforme más tiempo se mantenga en operación.

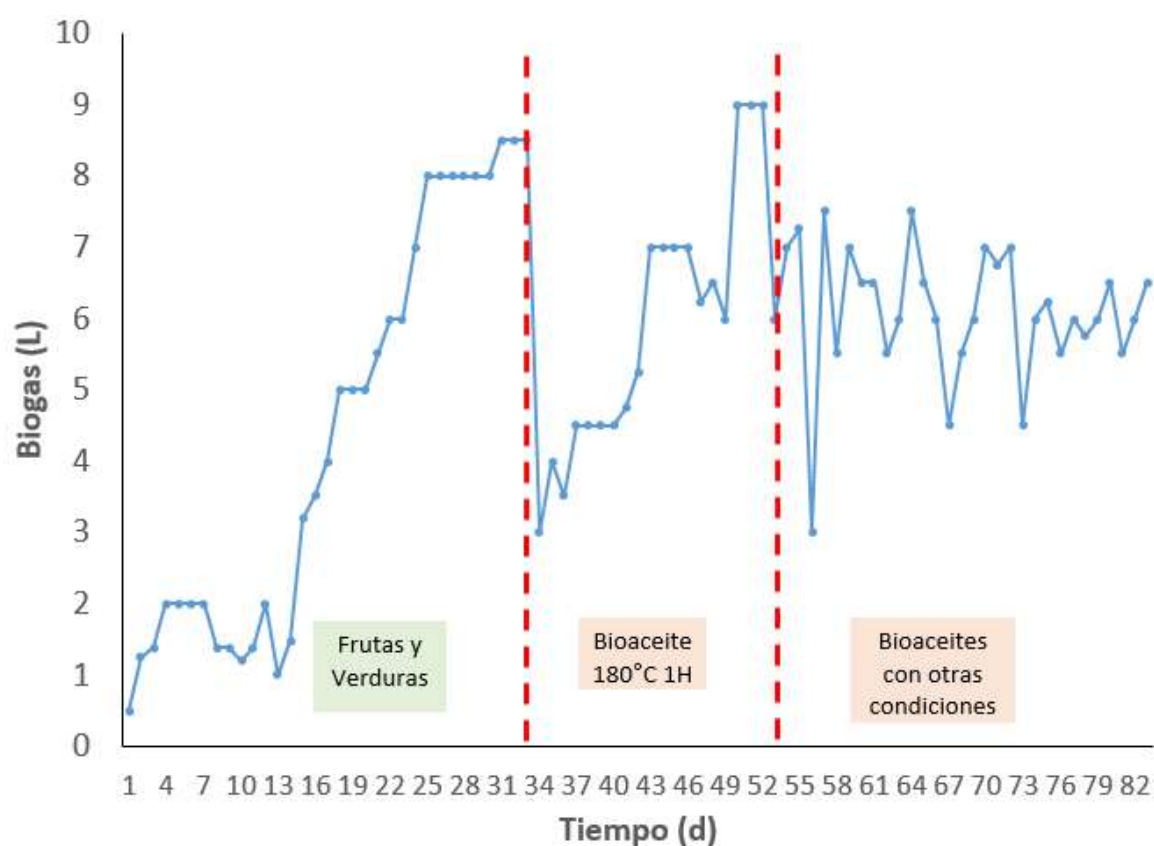


Figura 3.14 Producción diaria de biogás en Litros durante la operación modo continuo.

En cuanto a la producción en modo continuo se obtuvo un mínimo de 3 litros en el día 56 y un máximo de 7.5 L en los días 57 y 64, se observa menos estabilidad que en la etapas pasadas lo cual indica que si es un factor importante las condiciones



de tiempo y temperatura de la CHT bajo las cuales se obtuvo el sustrato para la producción de Biogás.

Estos valores se mantienen dentro del rango obtenido en otros estudios que utilizaron reactores con un volumen útil igual al utilizado en la investigación presente (2.5 L) Nava-Pacheco *et al.*, (2019) obtuvieron hasta 8.3 L/d con una CVA de 7 g DQO/L.d.

### 3.6.2 Rendimiento de metano de los bioaceites obtenidos a diferentes condiciones

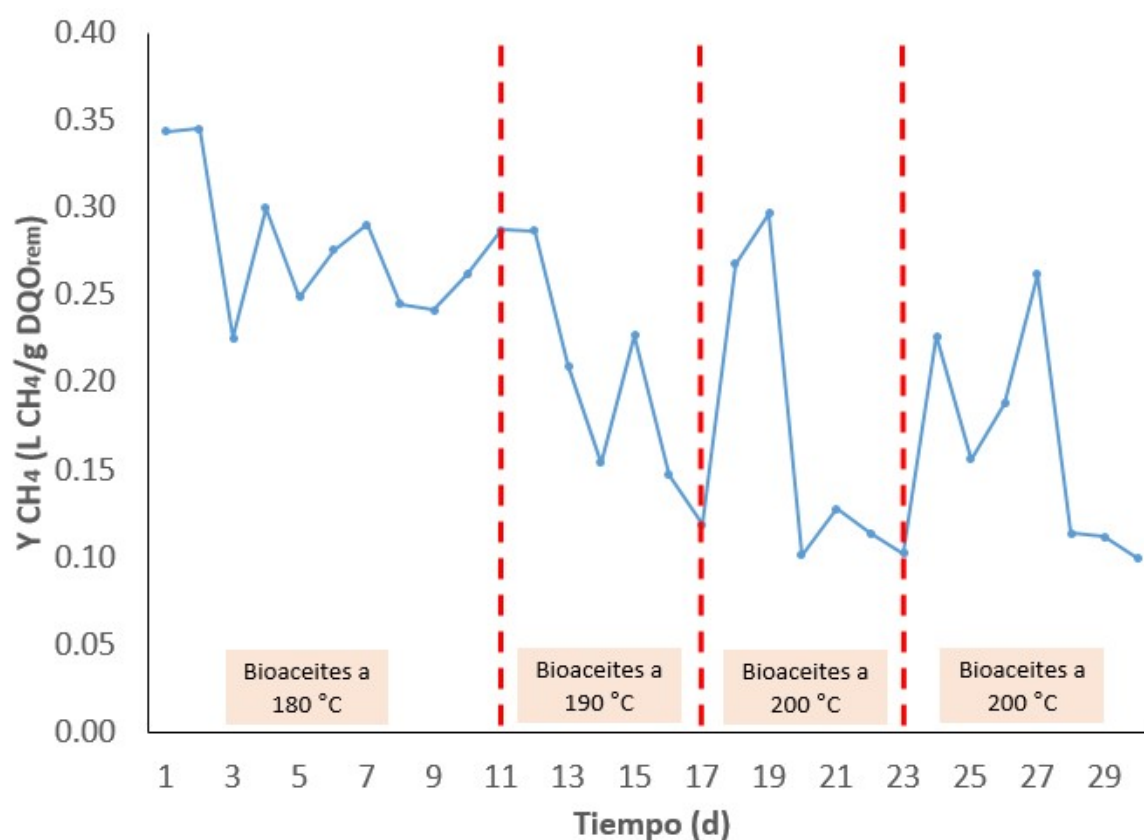


Figura 3.15 Rendimientos de metano en biogás.

Los resultados finales obtenidos fueron los rendimientos de metano del Biogás producido por el RHA en la etapa final de la operación, cuando se utilizaron los Bioaceites a diferentes temperaturas (180, 190, 200 y 210 °C) y tiempos de residencia (1, 2 y 3 h), se puede observar que el contenido de metano decrece cuando la severidad de la CHT fue mayor obteniéndose así los mejores

rendimientos para las condiciones más bajas las cuales fueron 180 °C - 1h con un valor de 0.34 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub>, valores muy próximos al teórico y los rendimientos más bajos en condiciones de 200 °C – 3h con solo 0.09 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> estos datos coinciden con lo obtenido en investigaciones similares Lucian *et al.*, (2020) donde se utilizaron la CHT y la DA para la producción de Biogás a partir de RSU quienes utilizaron temperaturas para la CHT de 180, 220 y 250 °C y tiempos de residencia de 1, 3 y 6 horas obteniendo los mejores rendimientos de metano con un valor de 0.205 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> en las condiciones de 180 °C a 1 hora. De acuerdo con la literatura, los bajos tiempos de residencia y las bajas temperaturas evitan la formación de compuestos biodegradables y/o tóxicos en el bioaceite, los cuales reducen la producción de metano en la DA (Codignole *et al.*, 2018).

Marin-Batista *et al.*, 2020 utilizaron de igual manera el acoplamiento de la CHT y la DA a partir de estiercol de vaca con temperaturas de 170, 200 y 230 °C y tiempos de residencia de 1 hora obteniendo el contenido de metano más alto de 0.294 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> cuando se utilizó el bioaceite obtenido en la temperatura más baja (170 °C).

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Este trabajo muestra el acoplamiento de un método termoquímico llamado Carbonización Hidrotérmica y un método biológico como lo es la Digestión anaerobia para el tratamiento de RSUO y así darles una valorización como bioenergéticos, buscando reemplazar a los métodos actuales contribuyendo al desarrollo sustentable. La Carbonización Hidrotérmica es un proceso capaz de tratar residuos con alto contenido de humedad sin necesidad de pasar por un proceso de secado lo cual hace a esta técnica económicamente rentable, a partir del cual se obtienen dos productos: una parte sólida conocida como hidrochar el cual es combustible sólido y que en este estudio mostró un poder calorífico superior a los 15 MJ/Kg. La temperatura y el tiempo de residencia de la CHT son parámetros que tienen un impacto significativo dentro del proceso, las temperaturas altas (arriba de 200 °C) favorecen al poder calorífico del combustible sólido, mientras que las temperaturas por debajo de los 200 °C favorecen a la producción del Bioaceite. A partir de la caracterización del bioaceite obtenido en la CHT se puede sugerir este líquido como sustrato en la DA para la producción de biocombustibles y se puede considerar que los mejores rendimientos de metano se obtienen a partir de las condiciones menos severas utilizadas para la CHT.

Se estudió experimentalmente la integración del proceso de CHT y DA probando 12 diferentes condiciones (4 temperaturas y 3 tiempos de reacción diferentes) para maximizar la recuperación de energía a partir de los RSUO. Los resultados muestran que las condiciones de la reacción fue un parámetro importante que afectaba a la calidad Biogás obtenido en la Digestión anaerobia.

Se evaluó el rendimiento de un Reactor Híbrido Anaerobio mediante las remociones de DQO y se obtuvieron resultados de hasta el 96.86 % en  $DQO_T$  y del 97.7 % en DQOs, Se realizaron cambios de sustrato y el dispositivo no mostró un estrés significativo ante estos cambios siendo capaz de mantener remociones por arriba

del 50 %. Los mejores rendimientos de metano fueron de 0.34 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> en las condiciones más suaves (180 °C a 1 h) y los rendimientos más bajos obtenidos fueron de 0.09 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>rem</sub> en las condiciones más severas (210 °C a 3 h), por lo tanto se recomienda usar temperaturas por debajo de los 200 °C y tiempos de residencia cortos para maximizar el rendimiento de metano en el Biogás.

## **RECOMENDACIONES**

Realizar una separación adecuada de los residuos sólidos urbanos orgánicos antes de realizar la CHT ya que aún se encuentran presentes residuos sólidos inorgánicos los cuales afectan el proceso térmico.

Realizar corridas de carbonización hidrotérmica a temperaturas más altas a partir de 210 °C con tiempos de residencia más largos de 4 horas para evaluar la concentración de DQO que presenta el bioaceite.

Ampliar la caracterización del bioaceite, sugiriendo realizar nitratos y fosfatos ya que esto facilita trabajos a futuro con la fracción líquida obtenida.

Investigar el acoplamiento de la digestión anaerobia con otros métodos de conversión térmica como lo son la pirólisis y gasificación.

Utilizar Cvas más altas con tiempos de residencia mayores para evaluar la producción de biogás diaria y el contenido de metano.

Es importante seguir investigando sobre la generación de bioenergéticos utilizando reactores anaerobios ya que éstos presentan una remoción importante en la DQO lo que permite tratar no solo RSUO si no también otro tipo de residuos aguas residuales.

### Referencias bibliográficas

Aragón-Briceño, C.I., Pozarlik, A.K., Bramer, E.A., Lukasz Niedzwiecki, Pawlak-Kruczek, H. y Brem, G. (2021). *Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and phosphorus approach: A review*. Renewable Energy, 171, 401-415, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.109>.

Ariza Calvo, D., Rincón Ravelo, M., Paz Cadavid, C. A., y Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). *Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia*. Revista Colombiana de Biotecnología, 21(2), 118-130.

Ayuntamiento de Orizaba. (2018). Limpia Pública y Ecología. Recuperado de: <http://www.orizaba.gob.mx/Dependencias/Limpia-p%C3%BAblica#>.

Ayuntamiento de Orizaba, (2021) “*Ecori*” *Planta de separación de residuos sólidos Orizaba*. Revista Iberoamericana de gobierno local. ISSN: 2173-8254.

Bautista Castelán, L., Martínez Olivarez, P. y Vidal Álvarez M. (2021). *Desempeño urbano sustentable mediante tres indicadores: residuos sólidos, transporte público, áreas verdes*. Orizaba, Veracruz, México. REVISTARQUIS, 10(1), 61-78.

Becker R., Dorgerloh U., Paulke E., Mumme J. y Nehls I. (2014). *Carbonización hidrotermal de la biomasa: principales componentes orgánicos de la fase acuosa*. Ingeniería y tecnología química, 37 (3), 511-518.

Broch A., Jena U., Hoekman S.K., Langford J. (2013). *Analysis of Solid and Aqueous Phase Products from Hydrothermal Carbonization of Whole and Lipid-Extracted Algae*. Energies. 7(1), 62-79. <https://doi.org/10.3390/en7010062>.

Cáceres Bardález, G. (2017). Determinación de los niveles de generación de residuos sólidos domésticos de la ciudad de Moyobamba.



Cao, Z., Hülsemann, B., Wüst, D., Illi, L., Oechsner, H., y Kruse, A. (2020). *Valorization of maize silage digestate from two-stage anaerobic digestion by hydrothermal carbonization*. Energy Conversion and Management, 222, 113218.

Castro Olarte, J., Cecilio Cabrera, Y., Gonzales Huamán, T. J., y Sumarriva Bustinza, L. (2019). *Remoción de materia orgánica en reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente en el tratamiento de aguas residuales del camal de Huancavelica*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 85(3), 362-375.

Chaparro-Garnica, J., Mostazo-López, M. J., Salinas-Torres, D., Morallon, E., y Cazorla-Amorós, D. (2020). *Residuos de biomasa como plataforma para obtener materiales carbonosos porosos mediante carbonización hidrotermal en presencia de  $H_3PO_4$* . Boletín Grupo Español Carbón 55, 22-27.

Codignole Luz, F., Volpe, M., Fiori, L., Manni, A., Cordiner, S., Mulone, V. y Rocco, V. (2018). *Spent coffee enhanced biomethane potential via an integrated hydrothermal carbonization-anaerobic digestion process*. Bioresour. Technol. 256, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.021>.

Cruz Ramos, A., Vallejo Cantú, N. A., y Alvarado Lassman, A. (2019). *Mejoramiento de la fluidización de un reactor anaerobio híbrido semifluidizado* (Doctoral dissertation, TecNM campus Orizaba).

Czerwińska, K., Śliz, M., y Wilk, M. (2022). *Hydrothermal carbonization process: Fundamentals, main parameter characteristics and possible applications including an effective method of SARS-CoV-2 mitigation in sewage sludge. A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 154, 111873.

De la Rubia, M. A., Villamil, J. A., Rodríguez, J. J., Borja, R., y Mohedano, A. F. (2018). *Mesophilic anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid*

*waste with the liquid fraction from hydrothermal carbonization of sewage sludge.* Waste management, 76, 315-322.

De la Rubia, M. A., Díaz E., Gómez Herrero E., Manzano J., Marin Batista J., Mena I. y Mohedano A. (2018). *Aplicación de la carbonización hidrotermal para la valoración de residuos.* Waste Management, 1-4. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.046>.

Doublet, J., Boulanger, A., Ponthieux, A., Laroche, C., Poitrenaud, M., y Cacho Rivero, J. A. (2013). *Predicting the biochemical methane potential of wide range of organic substrates by near infrared spectroscopy.* Bioresource Technology, 128, 252–258. doi:10.1016/j.biortech.2012.10.044.

El-Fadel, M., Saikaly, P. y Ghanimeh, S. (2013). *Puesta en marcha y estabilidad de la digestión anaeróbica termófila de OFMSW.* Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43(24), 2685–2721. doi:10.1080/10643389.2012.694333.

Fang, J., Zhan, L., Ok, Y. S., y Gao, B. (2018). *Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass.* Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 57, 15-21.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2013). *La bioenergía y los biocombustibles. Vías de la sostenibilidad.* <http://www.fao.org/3/a-ar589s.pdf>, consulta Febrero de 2022.

Flores, D., Albacura, E., y Achote, J. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante carbonización hidrotermal.* Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Información, 30, 229-239.

Guachi Cabrera, P. E. (2019). Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña. Carrera de Ingeniería Química. Quito: UCE, 67.

González M. (2009). *Producción de bioenergía en el norte de México: tan lejos y tan cerca*. Frontera Norte, 21(41), 177-183.

González Paz, J. R., Vallejo Cantú, N. A., y Alvarado Lassman, A. (2015). *Tratamiento anaerobio del efluente proveniente del proceso de una industria cítrica en un reactor híbrido*. (TecNM campus Orizaba).

Gould, M. C. (2015). *Bioenergy and Anaerobic Digestion*. Bioenergy, 297–317. doi:10.1016/b978-0-12-407909-0.00018-3.

Güereca, L. P. (2017). *Evaluación comparativa de los impactos ambientales de la producción de clínker con combustible fósil frente a combustible derivado de los residuos*. Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM, 86(1), 16-19.

He, C., Wang, K., Giannis, A., Yang, Y., y Wang, J. Y. (2015). *Products evolution during hydrothermal conversion of dewatered sewage sludge in sub-and near-critical water: Effects of reaction conditions and calcium oxide additive*. International journal of hydrogen energy, 40(17), 5776-5787.

Hernández-Nazario, L., Benítez-Fonseca, M., y Bermúdez-Torres, J. M. (2018). *Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba*. Tecnología Química, 38(2), 369-379.

Houbron, E., Sandoval, M., y Hernández, A. (2016). *Tratamiento de vinazas en un reactor de lecho fluidizado inverso anaerobio*. Rev. Int. Contam. Ambie, 32(3) 255-266, doi: 10.20937/RICA.2016.32.03.01.

Jeevahan, J., Sriramanjaneyulu, G., Durairaj, R. B., y Mageshwaran, G. (2018). Experimental investigation of the suitability of 1-butanol blended with biodiesel as an alternative biofuel in diesel engines. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 15, 72–77. doi:10.1016/j.bcab.2018.05.013

Juárez-García, I. A., Snell-Castro, R., Méndez-Contreras, J. M., Vallejo-Cantú, N. A., Alavarado-Lassman, A., y Rosas-Mendoza, E. S. (2022). *Performance of an anaerobic biofilm reactor through the application of different operational conditions*. *Renewable Energy, Biomass y Sustainability*, 4(1), 14-22.

Kambo, H.S. y Dutta, A. (2015) *A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications*. *Renew.Sust. Energ. Rev.* 45, 359- 378.

Kopytynski, W. R. (2015). *Fabricación de combustibles derivados de residuos (CDR) para la industria*. Buenos Aires: Gestión Ambiental Empresaria.

Lew, B., Lustig, I., Beliaevski, M., Tarre, S. y Green, M. (2011). *An integrated UASB-sludge digester for raw domestic wastewater treatment in temperate climates*. *Bioresour Technol* 102, 4921–4924.

Lloréns, M. D. C. E., Torres, M. L., Arrechea, A. P., Navarro, R. M., y Colomina, A. F. (2007). *La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás*. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 38(1), 33-37.

Lorenzo Acosta, Y. y Obaya Abreu, M. C. (2005). *La digestión anaerobia. Aspectos teoricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1) ,35-48. ISSN: 0138-6204.

López-Yamunaqué, A., y Iannacone, J. A. (2021). *La gestión integral de residuos sólidos urbanos en América Latina*. Paideia XXI, 11(2), 453-474.

Lu, J. y Gao, X. (2021). *Biogas: Potential, challenges, and perspectives in a changing China*. Biomasa y Bioenergía, 150, 106-127. doi:10.1016/j.biombioe.2021.106127.

Lucian, M., Volpe, M., Gao, L., Piro, G., Goldfarb, J. L., y Fiori, L. (2018). *Impact of hydrothermal carbonization conditions on the formation of hydrochars and secondary chars from the organic fraction of municipal solid waste*. Fuel, 233, 257-268.

Lucian, M., Volpe, M., Merzari, F., Wüst, D., Kruse, A., Andreottola, G., y Fiori, L. (2020). *Hydrothermal carbonization coupled with anaerobic digestion for the valorization of the organic fraction of municipal solid waste*. Bioresource technology, 314, 123734.

Lyu, Z., Shao, N., Akinyemi, T., y Whitman, W. B. (2018). *Methanogenesis*. Current Biology, 28(13), 727–732. doi:10.1016/j.cub.2018.05.021

Maghanaki, M.M., Ghobadian, B., Najafi, G. y Galogah, R.J. (2013). *Potential of biogas production in Iran*. Revisiones de energía renovable y sostenible, 28, 702–714. doi:10.1016/j.rser.2013.08.021

Marin-Batista, J. D., Villamil, J. A., Qaramaleki, S. V., Coronella, C. J., Mohedano, A. F., y De La Rubia, M. A. (2020). *Energy valorization of cow manure by hydrothermal carbonization and anaerobic digestion*. Renewable energy, 160, 623-632.

Martínez, J. A. V. (2019). *Valorization of secondary sludge by hydrothermal carbonization coupled with anaerobic digestion*. Universidad Autónoma de Madrid.

Matzakas, L., Gao, Q., Jansson, S., Rova, U. y Christakopoulos, P. (2017). *Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals*. Electronic Journal of Biotechnology. 26, 69-83.

Meegoda, J.N., Li B., Patel, K. y Wang L.B. (2018). *Una revisión de los procesos, parámetros y optimización de la digestión anaeróbica*. Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública. 15(10):2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>.

Merzari, F., Goldfarb, J., Andreottola, G., Mimmo, T., Volpe, M., y Fiori, L. (2020). *Hydrothermal carbonization as a strategy for sewage sludge management: Influence of process withdrawal point on hydrochar properties*. Energies, 13(11), 2890.

Molino, A., F. Nanna, Y. Ding, B. Bikson y G. Braccio. (2013). *Biomethane Production by Anaerobic Digestion of Organic Waste*. Fuel. 103, 1003–1009.

Montiel J. (2010). *Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México*. Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, 6(1), 57-62.

Muñoz D., Cuatin M. y Pantoja A. (2014). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorrefinería*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 12(2), 10-19.

Nava-Pacheco, D., Juárez-García, I. A., Landeta-Escamilla, O., Del Moral, S., y RosasMendoza, E. (2019). *Potencial bioenergético a partir de residuos agroindustriales del estado de Veracruz*. Renewable energy, biomass y sustainability, 1(1), 53-64.

Nordi, G. H., Palacios-Bereche, R., Gallego, A. G., y Nebra, S. A. (2017). *Electricity production from municipal solid waste in Brazil*. Waste Management & Research, 35(7), 709–720. doi: 10.1177/0734242x17705721

Ostrem, M.K., Millrath, K. y Themelis, N.J. (2004). *Combining anaerobic digestion and waste to energy*. In: 12th North America waste to energy conference. Columbia University, New York.

Palacios, E. (2019). *Producción de diésel renovable mediante hidrotratamiento de ácidos grasos derivados de residuos animales*. Revista Electrónica De Investigación De Tecnologías Educativas, 4(4), 44-48.

Parawira, W. (2012). *Enzyme research and applications in biotechnological intensification of biogás production*. Crit Rev Biotechnol 32(2), 172–186.

Piña Hernández, S., Riesco Ávila, J. M., Barrón Hernández, C. I., y Vásquez Hernández, J. B. (2017). *Conversión termoquímica de residuos plásticos en hidrocarburos*. JÓVENES EN LA CIENCIA, 3(2), 2635–2639.

Parra-Orobio, B.A., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L.F., Cárdenas-Cleves, L.M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W.A., y Ordóñez-Andrade, J.A. (2014). *Influencia del PH sobre la digestión anaerobia de Biorresiduos de origen municipal*. Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica, 17 (2), 553-562

Pham, TPT, Kaushik, R., Parshetti, GK, Mahmood, R. y Balasubramanian, R. (2015). *Tecnologías de conversión de residuos de alimentos en energía: estado actual y direcciones futuras*. Gestión de residuos, 38, 399–408. doi:10.1016/j.wasman.2014.12.004

Ponce Ballester, E. (2013). *El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*. Universidad Politécnica de Valencia.

Ramke, H. G., Blöhse, D., Lehmann, H. J., y Fettig, J. (2009). *Hydrothermal carbonization of organic waste*. Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium. Sardina: Pro., CISA pub.

Reyes Aguilera, E. A. (2018). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Revista Científica De FAREM-Estelí, (24), 60–81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>.

Rincón Martínez, J. M. y Silva Lora, E. E. (2015). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá Colombia: La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía.

Rosas-Mendoza, E. S., Méndez-Contreras, J. M., Martínez-Sibaja, A., Vallejo-Cantú, N. A. y Alvarado-Lassman, A. (2018). *Anaerobic digestion of citrus industry effluents using an Anaerobic Hybrid Reactor*. Clean Technologies and Environmental Policy, 20(7), 1387-1397.

Salgado-Hernández, E., Alvarado-Lassman, A. y Méndez-Contreras, J. M. (2019). *Mejoramiento de la etapa de hidrólisis de los Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) mediante un pretratamiento ácido, en la producción de bioenergéticos a nivel piloto*. Tecnológico Nacional de México, campus Orizaba.

Sánchez A., Gutiérrez A., Muñoz J. y Rivera C. (2010). *Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósico*. Revista Tumbaga, 1(5), 61-91.



SEFIPLAN. (2019). Cuadernillos Municipales. Orizaba: Veracruz, Gobierno del Estado.

SEMARNAT. (2020). Programa Nacional Para La Prevención Y Gestión Integral de Los Residuos: Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos> (consultada febrero, 2022).

SEMARNAT. (2017). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu> (Consultada febrero, 2022).

Smith, A. M. y Ross, A. B. (2016). *Producción de biocarbón, biometano y fertilizantes a partir de algas mediante carbonización hidrotermal*. Investigación de algas, 16, 1-11.

Soroa del Campo., S., Lopetegui Garnika, J., Almandoz Peraita, A., y Garcia de las Heras, J.L. (2006). *Diseño de reactores híbridos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales industriales*. España. ISSN 0211-8173 60-67

Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., Yu, X., (2015). *Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation*. Renew. Sustain. Energy Rev. 51, 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>

Tufaner, F. y Demirci, Y. (2020). *Predicción de la tasa de producción de biogás del reactor híbrido anaeróbico mediante redes neuronales artificiales y modelos de regresión no lineal*. Tecnologías Limpias y Política Ambiental. Doi:10.1007/s10098-020-01816-z

Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., y Ng, W. J. (2018). *Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste*

(OFMSW): *Progress and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 93, 380–399. doi:10.1016/j.rser.2018.05.051

Quispe, J. (2020). *Evaluación de la reducción de la contaminación por la implementación del programa de segregación de residuos sólidos en la ciudad de Pichanaqui, provincia de Chanchamayo periodo 2015 - 2017*. En Universidad Nacional Agraria de la Selva. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Van Lier, J.B., Sanz Martin, J.L. y Lettinga, G. (1996). *Effect of temperature on the anaerobic thermophilic conversion of volatile fatty acids by dispersed and granular sludge*. Water Res 30,199–207.

Vargas Corredor, Y. A., y Pérez Pérez, L. I. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente*. Revista Facultad De Ciencias Básicas, 1(1), 59-72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>.

Valdés, O. y Palacios, O. (2016). *Evolución y situación actual de plantaciones para biocombustibles: perspectivas y retos para México*. Agroproductividad, 9(2), 33-41.

Wirth, B., Reza, T. y Mumme, J. (2015). *Influencia de la temperatura de digestión y la tasa de carga orgánica en el tratamiento anaeróbico continuo del licor de proceso de la carbonización hidrotermal de lodos de depuradora*. Tecnología de biorecursos, 198, 215–222. doi:10.1016/j.biortech.2015.09.02.

Xia, A., Cheng, J. y Murphy, D.J. (2016). *Innovation in biological production and upgrading of methane and hydrogen for use as gaseous transport biofuel*. Biotechnol Adv (in press). <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.009>

Yang, Y., Liew, R.K. y Tamothran, A.M. (2021). *Gasificación de combustible derivado de residuos sólidos municipales para la producción de energía: una*

*revisión*. Environ Chem Lett 19, 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01177-5>

Yepes, S., Montoya, L. y Orozco, F. (2008). *Valorización de residuos agroindustriales –frutas– en Medellín y el sur del valle del Aburrá, Colombia*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 61(1), 4422-4431.

Zeeman, G. (1991). *Mesophilic and psychrophilic digestion of liquid manure*. Department of Environmental Technology, Agricultural University, Wageningen.