

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Proyecto de aplicación

“Dimensionamiento de biodigestor a partir de la caracterización y análisis de residuos sólidos orgánicos de la cafetería CETYS Universidad”

Para obtener el grado de
Maestro en ingeniería e innovación

Presenta:

Salvador Eduardo Vásquez Dávalos

Directora:

Dra. Karla Garduño Palomino

Mexicali, Baja California a 18 de septiembre de 2020

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis / Proyecto de Ingeniería e Innovación

“Dimensionamiento de biodigestor a partir de la caracterización y análisis de residuos sólidos orgánicos de la cafetería CETYS Universidad”

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Salvador Eduardo Vásquez Dávalos

Director de proyecto: Karla Garduño Palomino

Co-director de proyecto: Mydory Oyuky Nakasima López

Comité evaluador:

Dr. Jorge M. Jauregui S.

Dr. Juan Terrazas G.

Dra. Karla Garduño P.

Mexicali, Baja California a 18 de septiembre de 2020

Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dedicado a mis padres, esposa, hijos, amigos, tutores y todas aquellas personas que me apoyaron y alentaron en seguir hasta concluir el posgrado.

*"¡Serenidad, serenidad y paciencia, Solín!
Siempre hay un camino cuando
se usa la inteligencia"*

Kalimán (Navarro y Vásquez González) – del comic “*La serpiente humana*”,
capítulo 2, pg. 39.

Agradecimientos

Agradezco a todos y cada una de las personas que siempre me brindaron su apoyo en todo momento durante todo el proceso del posgrado.

A mi directora de tesis, la Dra. Karla Garduño Palomino, por haber depositado su confianza en mi desde el proceso de selección; su tiempo, dedicación y amistad son valores que siempre tendré presente.

A mi co-directora de tesis, la Dra. Mydory Oyuky Nakasima López, por estar al tanto en todo momento para brindarme el apoyo necesario; gracias por su amistad y toda su experiencia.

A mi esposa e hijos, quienes siempre me apoyaron cada uno en su forma muy especial y que fueron realmente el motivo por el cual ingresé al posgrado.

A mis padres y familiares por sus consejos y confianza, siempre estuvieron presente desde el principio hasta el último momento.

A Global Mechanical, CETYS, Fundación Telmex y CONACYT que a través de sus programas de becas y apoyos en general, me fue posible terminar el posgrado.

Finalmente, a Alexandra Elbakyan, quien sin pedir nada a cambio me brindó la posibilidad de obtener información valiosa para documentarme.

Contenido

| | |
|--|----|
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.3 Problemática y justificación | 3 |
| 1.4 Preguntas de investigación | 9 |
| 1.5 Objetivos | 9 |
| 1.5.1 Objetivo general | 9 |
| 1.5.2 Objetivos específicos..... | 10 |
| 1.6 Hipótesis | 10 |
| Capítulo 2: Marco teórico | 11 |
| 2.1 Residuos | 11 |
| 2.1.1 Definición..... | 11 |
| 2.1.2 Residuos sólidos urbanos..... | 11 |
| 2.1.3 Caracterización de RSU..... | 12 |
| 2.2 Biodigestión | 13 |
| 2.2.1 Biodigestores | 13 |
| 2.2.2 Biogás | 14 |
| 2.2.3 Biodigestión anaeróbica..... | 15 |
| 2.2.4 Etapas del proceso de biodigestión | 15 |
| 2.2.5 Parámetros a considerar en proceso de biodigestión | 17 |
| Capítulo 3: Metodología | 20 |
| 3.1 Generación y caracterización de RSO en cafetería de CETYS Universidad..... | 21 |
| 3.1.1 Definición de fecha y hora. | 22 |
| 3.1.2 Estimación de la generación diaria de los RSO..... | 23 |
| 3.1.3 Muestreo, caracterización y captura de datos..... | 24 |
| 3.2 Análisis físico-químico de los RSO..... | 26 |
| 3.2.1 Densidad..... | 27 |
| 3.2.2 Potencial de hidrógeno (pH)..... | 28 |
| 3.2.3 Humedad | 29 |
| 3.2.4 Sólidos Totales (ST) | 31 |
| 3.2.5 Sólidos Volátiles (SV):..... | 32 |
| 3.2.6. Sólidos Fijos (SF)..... | 33 |
| 3.2.7 Demanda química de oxígeno (DQO): | 33 |

| | |
|--|----|
| 3.3 Dimensionamiento teórico de biodigestor para RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad | 36 |
| 3.3.1 Cálculo del volumen del reactor..... | 37 |
| 3.3.2 Cálculo del volumen del contenedor de biogás..... | 37 |
| 3.3.3 Cálculo del volumen total del biodigestor..... | 38 |
| 3.4 Estimación teórica de producción de biogás de los RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad | 38 |
| Capítulo 4: Resultados | 39 |
| 4.1 Estudio de generación de residuos sólidos..... | 39 |
| 4.2 Análisis de los residuos sólidos orgánicos en laboratorio..... | 41 |
| 4.3 Dimensionamiento teórico de biodigestor. | 42 |
| 4.4 Estimación teórica de la producción de biogás | 42 |
| Capítulo 5: Discusión, conclusión y recomendaciones | 43 |
| 5.1 Discusión..... | 43 |
| 5.2 Conclusión y recomendaciones | 48 |
| Referencias | 51 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Distribución de RSU generados en el país, SEDESOL 2013. | 1 |
| Figura 2. Distribución espacial del potencial económico de generación de electricidad por biogás en México (Ríos y Kaltschimitt, 2015)..... | 4 |
| Figura 3. Potencial económico y técnico para la generación de electricidad a partir de biogás en México (Ríos y Kaltschimitt, 2015). | 5 |
| Figura 4. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por tipo de combustible principal para cocinar según regiones climáticas. (INEGI, 2018)..... | 6 |
| Figura 5. Productos y condiciones de operación de diferentes tipos de proceso de transformación de biomasa, (Thuy Pham, et al., 2014) | 7 |
| Figura 6. Fuente: Art. 18 de la LGPIR. | 11 |
| Figura 7. Ejemplo de residuos municipales clasificado por sectores. (Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de RSM, SEDESOL, 1996). | 12 |
| Figura 8. Cantidad de biodigestores alrededor del mundo, Cheng et al., 2014. | 13 |
| Figura 9. Principales aplicaciones para biodigestores en México, Linnenberg, 2015..... | 14 |
| Figura 10. Composición de gases del biogás, (Cheng et al., 2014) | 14 |
| Figura 11. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica, (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991) | 16 |
| Figura 12. Valores mínimos, óptimos y máximos de temperatura en el proceso de fermentación, (Varnero, 2011)..... | 18 |
| Figura 13. Rango de temperatura de las bacterias y su sensibilidad. (Varnero, 2011) | 18 |
| Figura 14. Características de acuerdo al pH del efluente, (Vásquez y Riveros, 2013.)..... | 19 |
| Figura 15. Ubicación de la cafetería de Cetys Universidad. Google Maps, s.f..... | 20 |
| Figura 16. Contenedor para residuos generales..... | 21 |
| Figura 17. Contenedor especial para bolsa de basura segregada. | 22 |
| Figura 18. Días en que se realizó el estudio de caracterización. | 22 |
| Figura 19. Dinamómetro utilizado para determinar el peso de la bolsa de RSO..... | 23 |
| Figura 20. Ejemplo de toma de lectura al pesar una bolsa en el dinamómetro..... | 24 |
| Figura 21. Bolsa de residuos sobre lona de plástico de 2x2m. | 24 |
| Figura 22. a) Bolsa con residuos mixtos dentro de ella. b) Residuos separados por su tipo..... | 25 |
| Figura 23. Residuo de pepino siendo pesado en la báscula digital. | 25 |
| Figura 24. Ejemplo de la muestra que fue refrigerada para posterior análisis. | 26 |
| Figura 25. Lectura del peso del tubo vacío en la balanza. | 27 |
| Figura 26. Lectura del tubo con muestra de residuo en la balanza..... | 28 |
| Figura 27. Lectura del equipo de medición de pH. | 29 |
| Figura 28. Lectura que muestra el pH de la mezcla..... | 29 |
| Figura 29. Crisoles dentro del horno análogo..... | 30 |
| Figura 30. Lectura del peso del crisol en la balanza analítica. | 30 |
| Figura 31. Crisol con muestra del residuo #1..... | 30 |
| Figura 32. Crisoles con muestras dentro del horno..... | 31 |
| Figura 33. Crisoles con residuo seco listas para ser introducidas a la mufla. | 32 |
| Figura 34. Ejemplo de crisol con residuo incinerado. | 33 |
| Figura 35. Porción de 10ml de una muestra..... | 34 |
| Figura 36. Porción de 10ml con 990ml de agua añadida en licuadora..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 37. Vaso de 200ml con mezcla en agitador magnético. | 35 |
| Figura 38. Viales con reactivo para digestión. | 35 |
| Figura 39. Lectura del colorímetro con vial dentro. | 36 |
| Figura 40. Gráficas que presentan la distribución del tipo de residuo obtenido en las temporadas..... | 39 |
| Figura 41. Clasificación de los residuos producto de la caracterización de otoño 2019. | 39 |
| Figura 42. Clasificación de los residuos producto de la caracterización de invierno 2020..... | 40 |
| Figura 43. Distribución de los residuos clasificados como Procesados y Sin Procesar..... | 40 |
| Figura 44. Desglose del tipo de residuos de cada muestra. | 41 |
| Figura 45. Distribución de los residuos clasificados como Procesados y Sin Procesar de las Muestras M ₁ , M ₂ y M ₃ | 41 |
| Figura 46. Resultados del análisis de laboratorio a las muestras M ₁ , M ₂ y M ₃ | 41 |
| Figura 47. Valores producto de la ecuación 10..... | 42 |
| Figura 48. Valores producto de la ecuación 9..... | 42 |
| Figura 49. Valores producto de las ecuaciones 11, 12 y 13. | 42 |
| Figura 50. Valores producto de la ecuación 14..... | 42 |
| Figura 51. Comparativos de resultados de residuos generados per cápita y por m ² con otras universidades de México. | 44 |
| Figura 52. Comparativa de resultados de ST, SV u pH de varios autores. | 45 |
| Figura 53. Potencial de producción de biogás al día de cada muestra analizada..... | 46 |
| Figura 54. Comparativo de contenido energético de diferentes tipos de combustibles. (IRENA, 2016). ... | 47 |
| Figura 55. Ejemplo del modelo actual del flujo de productos que usa la cafetería de CETYS y un modelo alternativo..... | 49 |

RESUMEN

Existen muchos factores que afectan tanto el diseño como el desempeño del proceso de digestión anaeróbica. La composición física y química de los residuos orgánicos ofrecen información relevante para el diseño y operación de digestores anaeróbicos ya que está directamente relacionado con la producción de biogás y el proceso de estabilización durante el desarrollo de la digestión anaeróbica, es por eso la importancia y necesidad de realizar un estudio de caracterización. Li, et al. (2015), sostienen que la producción teórica de metano de los residuos de comida tratados en un digestor anaeróbico y bajo condiciones mesofílicas, típicamente se encuentra en un rango de 0.4 a 0.5 L CH₄ g VS-1, durante el proceso los microorganismos anaeróbicos descomponen material biodegradable y lo convierten en biogás como producto principal (gas compuesto por: 60-70% de metano, 30-40% de dióxido de carbono, así como trazas de otros gases) y como subproducto se obtiene un biofertilizante que sirve como nutrientes para las plantas y regeneradores del suelo. Mediante la caracterización de los residuos sólidos orgánicos (residuos de comida) de la cafetería de CETYS Universidad, y con base a las normas mexicanas (NMX), el estudio resume la cantidad, composición y potencial de producción de metano que podría generarse en un digestor anaeróbico. La producción del biocombustible se traduce como ahorro en el consumo de gas LP para el Instituto Educativo. Esta información contribuirá al conjunto de conocimientos sobre diseños de biodigestores e investigación en instituciones educativas de todo el mundo, además de contribuir en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que producen los residuos sólidos orgánicos al ser quemados o dispuestos en los vertederos.

ABSTRACT

There are many factors that affect both the design and performance of the anaerobic digestion process. The physical and chemical composition of organic waste offer relevant information for the design and operation of anaerobic digesters since it is directly related to the production of biogas and the stabilization process during the development of anaerobic digestion, which is why it is important and necessary to carry out a characterization study. According to Li, et al. (2015), they claim that theoretical methane production rate from food waste in an anaerobic digester and under mesophilic conditions, typically maintain a range from 0.4 to 0.5 L CH₄ g SV⁻¹. During this process the anaerobic microorganisms break down biodegradable material into biogas as main product (gas composed of: 60-70% methane, 30-40% carbon dioxide, and traces of other gases) and a biofertilizer as a byproduct that can be used as a rich-nutrient residue for plants and soil. The aim of this document is present the results of the characterization study of the solid waste (food waste) from CETYS University restaurant based on official Mexican standards (i.e., NMX). The study summarizes the quantity, composition and potential production of methane that could be generated in an anaerobic digester. Biogas production is translated as savings in Liquefied Petroleum Gas (LPG) for the Institution. This information will contribute to the body of knowledge about biodigester designs and research in educational institutions around the world, it also supports to the reduction of greenhouse gases (GHG) emission produced by solid organic waste when get burned or been disposal in landfills.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

Cada año, alrededor de un tercio de la comida producida a nivel global se pierde o se desperdicia (FAO, 2018), propiciando impactos sociales, económicos y medioambientales. Los residuos sólidos orgánicos se han vuelto un problema crítico alrededor del mundo derivado entre otros por el incremento de la población mundial, urbanización, mejora en el poder adquisitivo de los habitantes; lo que lleva a cambiar los hábitos de consumo, así como el aumento de adquisición de tierras, recursos y alimentos que en su producción generan altas emisiones de gases de efecto invernadero (Thyberg & Tonjes, 2016), lo anterior refleja una tendencia de aumento del problema en los próximos veinticinco años (Kunwar, et al., 2017) lo que indica que se requieren tomar medidas apropiadas para reducir esta propensión mediante políticas que adopten prácticas de gestión ambiental.

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), basado en las últimas cifras de un estudio de la entonces Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) 2013, menciona que, del total de la composición de los residuos sólidos urbanos generados en el país, el 52.4% corresponden a residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares, como se muestra en la Figura 1. La cifra anterior está compuesta por los desechos de sectores residenciales, comerciales e institucionales, donde un porcentaje lo representan las universidades en general.

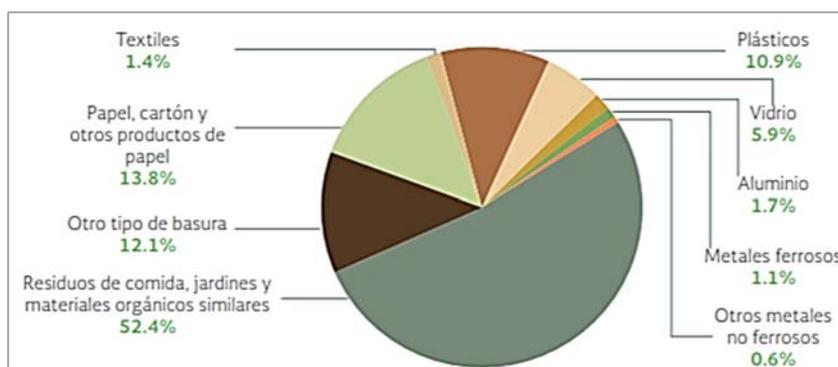


Figura 1. Distribución de RSU generados en el país, SEDESOL 2013.

La caracterización de residuos es el primer paso para cualquier política exitosa de gestión de residuos para una ciudad o región. En un estudio de la Universidad de Lagos,

Nigeria (Adeniran, Nubi, & Adelopo, 2017), se menciona que, actualmente las universidades se comportan como “mini ciudades” por contar con vastas coberturas territoriales y diversas actividades humanas, ocasionando efectos sobre el medio ambiente en menor o mayor medida.

En el país, se encuentran estudios de caracterización de instituciones educativas de nivel superior siendo los más sobresalientes los efectuados por la Universidad Autónoma de México (UNAM) (Alcántara, Cruz, & Santos, 2005), la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), campus Mexicali (Armijo, Ojeda, & Ramirez, 2008), la Universidad Autónoma Metropolitana, campus Azcapotzalco (UAM) (Espinoza, et al., 2008) y la Universidad Iberoamericana en la ciudad de México (IBERO) (Ruiz, 2012).

La cafetería de la CETYS Universidad Campus Mexicali abastece a más de ocho mil personas, entre alumnos de preparatoria, profesional y posgrado, así como personal docente y administrativo. Actualmente, los residuos sólidos generados en cafetería son puestos en bolsas dentro de dos contenedores; durante la jornada laboral el personal de limpieza se encarga de vaciarlos dentro de un contenedor con mayor volumen para que a su vez un camión se encargue de su recolección y disposición final.

De los procesos biológicos que se emplean para tratar los residuos orgánicos, la digestión anaerobia (DA) es uno de los que recibe cada vez más atención debido a su alto valor de valorización de residuos (Chien Bong, et al., 2018), de forma que ofrece la oportunidad de recuperar energía en forma de biogás (Tampio, et al., 2014), además de que requiere de menos espacio para operar que los rellenos sanitarios, compostaje o incineración (Ventura, Lee, & Jahng, 2014).

Los residuos de comida (RSO) como parte de la alimentación en un sistema anaerobio está ganando la atención esto debido al potencial de energía que puede ser recuperado (biogás, biofertilizante) así como contribuir a la economía circular, evitando emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de una mejor gestión de residuos (Chien Bong, et al., 2018).

Diversos estudios de caracterización de RSO se han realizado en diversas universidades y cocinas fuera de México con el objetivo de la obtención de información significativa que enriquezca la literatura en apoyo a la producción de biogás durante la DA: En cafeterías de universidades como en Pakistán (Jabeen, Yousaf, & Malik, 2015) donde se eliminaron

materiales no digeribles y los residuos se trituraron en tamaños de hasta 10mm; China (Yong, Dong, Zhang, & Tan, 2015) también removió elementos no digeribles y deshidrató sus residuos para después triturarlos en tamaños de 1mm a 2mm; en Irlanda (Browne & Murphy, 2014) usando una fuente segregada mixta de RSO cocida y cruda.

Los restaurantes, comedores o cafeterías escolares, donde se prepara, consumen y se disponen alimentos, concede un escenario ideal de estudio, siendo de considerable interés por parte del público y audiencias científicas, frecuentemente considerados como laboratorios conductuales en un entorno controlado para analizar y mejorar el patrón de consumo de alimentos (García, De Menna, & Vittuari, 2019).

1.3 Problemática y justificación

Hoy en día, el sector energético es el que marca el desarrollo de un país, debido a su característica de principio necesario para toda actividad. Cuando se habla de energía se está abarcando aspectos tales como: uso y abuso, fuente de abastecimiento, contaminación generada por la misma, peligro para la comunidad en casos de accidentes, entre otros. Afortunadamente, hoy en día en todo el mundo se están impulsando tecnologías de obtención de energía mediante fuentes renovables, como son la eólica, solar, biomasa, entre otras, que cubren una parte cada vez más considerable de la demanda energética, que además y principalmente contribuyen a la reducción de la carga ambiental al ser fuentes de energía limpias.

En México existe un gran potencial para el uso de energías renovables, sin embargo, un tipo de energía que puede ser obtenida de los residuos sólidos orgánicos (generados en la producción de alimentos) no ha sido totalmente explotada. El emplear los residuos para generación de energía no solo provee una alternativa adicional a la generación de energía, sino que contribuye a una mejor gestión de los residuos sólidos urbanos que se considera una de las mayores preocupaciones ambientales a nivel mundial.

La Secretaría de Energía (SENER) considera que el país cuenta con un potencial de 3,000 MW para la generación de energía eléctrica con biogás proveniente de la recuperación y el aprovechamiento del gas metano partiendo de residuos animales, RSU y el tratamiento de aguas residuales. El estudio destacó que hasta el año 2010 en México existían 721 biodigestores (Red Mexicana de Bioenergía, 2018).

En un estudio realizado por Ríos y Kaltschmitt (2015) se estima el potencial teórico, técnico y económico para la generación de electricidad a partir del biogás, producto de varias fuentes de residuos orgánicos en México. En este trabajo se identifican las regiones donde la producción es prometedora, teniendo en cuenta tres vertientes principales: generación a partir de aguas residuales, estiércol de ganado y residuos de rellenos sanitarios la fracción orgánica. De acuerdo a este estudio teóricamente 2405 de los 2458 municipios de México cuentan con ese potencial en menor o mayor medida y Mexicali es uno de ellos con un potencial de 2.1 TWh/a.

Mexicali es parte del 16% de los municipios de México que cuenta con el mayor potencial económico de generación de electricidad a partir de biogás considerando la tecnología comercial que se tenía registrado en el 2015 y sin la intervención del gobierno de alrededor de 192GWh/a, como se muestra en la Figura 2.

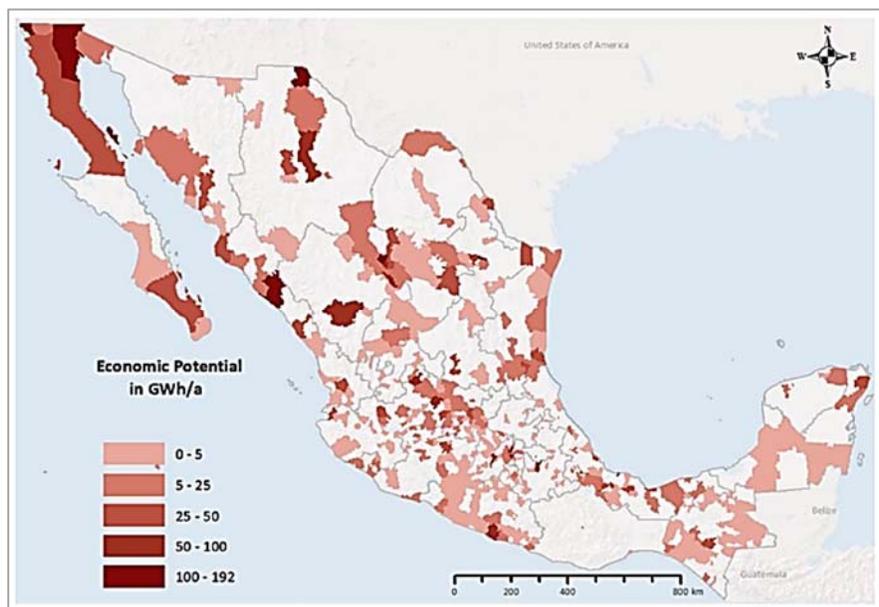


Figura 2. Distribución espacial del potencial económico de generación de electricidad por biogás en México (Ríos y Kaltschmitt, 2015)

En la Figura 3, se muestra el potencial económico de generación de electricidad a partir de residuos sólidos en rellenos sanitarios, el cual se reduce a solo 1% del potencial teórico inicial (Ríos y Kaltschmitt, 2015), debido a la gran incertidumbre de rendimientos de producción de biogás de residuos orgánicos reportados en los sistemas de colección de biogás, sin embargo, concluye que incentivos económicos deberían ponerse en

marcha para incrementar y estimular la producción y uso de biogás a partir de residuos orgánicos en general, en México.

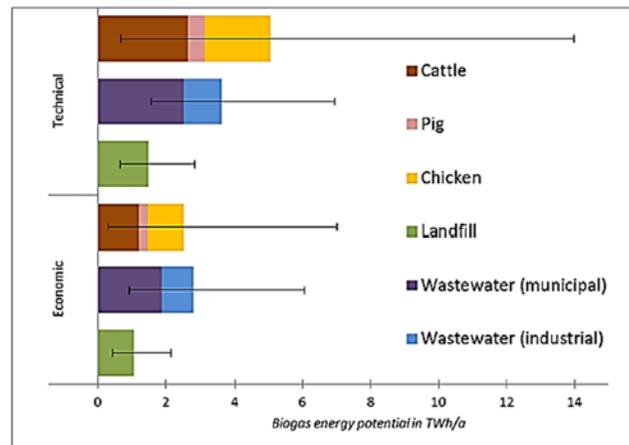


Figura 3. Potencial económico y técnico para la generación de electricidad a partir de biogás en México (Ríos y Kaltschmitt, 2015).

El problema de la basura en nuestro entorno es serio y requiere de tomar medidas suficientes para aminorar la cantidad de residuos que se desechan a diario. De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) Baja California produce y se recolectan más de dos mil ochocientas toneladas de RSU diariamente, lo que nos indica que en promedio cada habitante genera aproximadamente un kilo de residuos por día (Heras, 2018).

Solamente en Mexicali se generan alrededor de mil toneladas al día, entre sectores residenciales, de comercio e institucionales y somos una de las entidades federativas del país que reportamos la no separación de los residuos, es decir no contamos con separación selectiva en nuestro estado (Arango, 2018).

El INEGI en 2018, a través de la primera Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) en uno de los rubros, presentó datos sobre el uso de la energía térmica que las viviendas mexicanas utilizan; el combustible principal es el gas LP, con un 79%, seguida de la leña y gas natural con 11% y 7%, respectivamente. (INEGI, 2018). La mayor proporción se destina a la cocción de alimentos y el 85% de las viviendas declaró usar estufa para esa actividad como se muestra en la Figura 4.

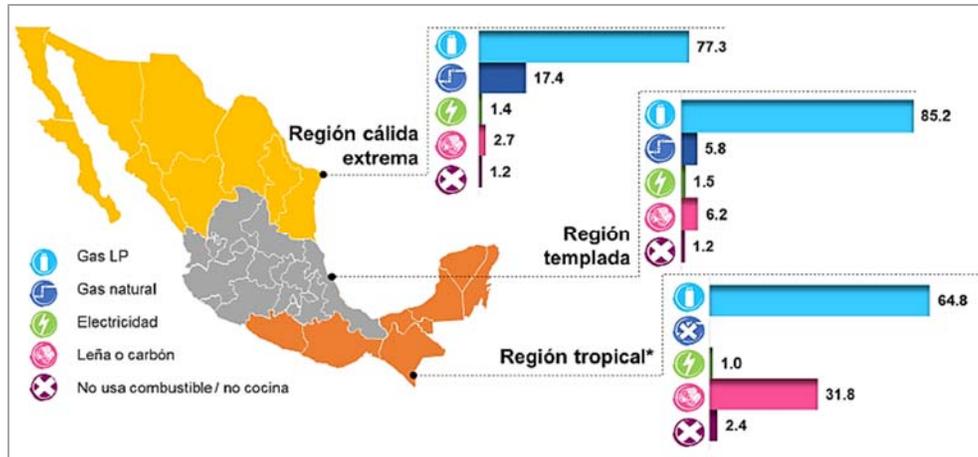


Figura 4. Distribución porcentual de viviendas particulares habitadas por tipo de combustible principal para cocinar según regiones climáticas. (INEGI, 2018)

Desde el año 2017, la Comisión Reguladora de Energía liberó el precio de gas LP para que éste fuera ofertado por distribuidores mediante costos de libre mercado (Solís, 2018). En México más del 70% de los hogares mexicanos utilizan este combustible fósil y Baja California se ubica con el mayor precio promedio del país (Sigler, 2018).

El destino final de los desperdicios orgánicos procedentes de restos de comida no es aprovechable y la mayoría terminan en los rellenos sanitarios. Se cuenta con un producto que puede ser aprovechable para los hogares y cualquier otro generador de residuos orgánicos de manera que contribuya a la economía del sector del cual provengan.

Con el aumento de los costos asociados al suministro de energía en concordancia con la correcta eliminación de los residuos sólidos orgánicos, así como las preocupaciones públicas relativas a la calidad del medio ambiente, la conversión de desechos orgánicos en energía resulta una práctica benigna y económicamente atractiva.

Existen tratamientos para la transformación de la biomasa en energía, transformaciones químicas por métodos como la combustión (oxidación química), pirólisis, gasificación que además de la transformación biológica (digestión anaeróbica) pudieran implementarse de la misma forma para mitigar el hecho de que los residuos solo sean dispuestos en los rellenos sanitarios.

Algunas de las características importantes de los desperdicios de alimentos es que incluyen un 74 a 90% de contenido de humedad (Zhang, et al., 2007). Debido a la humedad relativamente alta, los tratamientos térmicos comunes como la incineración,

gasificación y/o pirólisis se consideran energéticamente desfavorables, lo anterior aunado a posibles problemas diversos de contaminación ambiental como resultado de ausencia de medidas cautelares como control de contaminación del aire (asociados a la incineración), lo que sugiere un impulso para la búsqueda de alternativas más respetuosas con el medio ambiente.

Métodos como pirólisis y gasificación son favorables en términos de reducción de emisiones de CO₂ (Pinochet, 2015) y costos de operación comparados con la incineración, sin embargo, la variabilidad de las composiciones de los residuos sólidos orgánicos influye significativamente en los procesos, temas clave como los contenidos de humedad y menores valores caloríficos.

Alternativamente se podrían convertir los residuos a etanol por medio de fermentación produciendo microorganismos, sin embargo, se requerirían técnicas o tratamientos previos para hidrolizar los residuos para producir azúcares fermentables, lo que contribuye al aumento de costos en la totalidad del proceso (Matsakas, Kekos, Loizidou, & Christakopoulos, 2014).

La figura 5, muestra los productos y condiciones de operación de los diferentes tipos de proceso de transformación de biomasa (Thuy Pham, et al., 2014)

| Procesos de transformación | Condiciones de operación | Productos principales | Productos secundarios |
|----------------------------|---|--|-----------------------|
| Incineración | 400-540°C | Calor, electricidad | Cenizas |
| Pirólisis | 250-750°C, en ausencia de oxígeno | Char, aceite o tar, gas (CO, CH ₄ , hidrocarburos, H ₂ , CO ₂ , depende de las condiciones del proceso) | Char |
| Gasificación | 350-1800°C, oxígeno o vapor, 1-30 bar | Gas (CO, CH ₄ , N ₂ , H ₂ , CO ₂ , depende de las condiciones del proceso) | Cenizas |
| Digestión anaeróbica | 35-55°C, mesofílico, reactor, 1-10,000 m ³ | Gas (mayores componentes de CH ₄ y CO ₂) | Fertilizante |
| Fermentación Etanol | 30-35°C, pH 4.5-6.0, anaeróbico | Etano, CO ₂ | Comida animal |

Figura 5. Productos y condiciones de operación de diferentes tipos de proceso de transformación de biomasa, (Thuy Pham, et al., 2014)

Se encuentra evidencia de análisis y estudios de la biomasa generada en cafeterías de escuelas, hostales, sectores domésticos, donde se analizó y estudió la biomasa para posteriormente diseñar y construir un prototipo a pequeña escala con el objetivo mostrar

los beneficios económicos, sociales y medio ambientales al poner en práctica esta tecnología, como sucedió en el Colegio de Ingeniería de Mahendra, India (Mohan & Jagadeesan, 2013), el diseño de un sistema para el salón de cafetería del Instituto de Tecnología en Jimma Etiopía (Mosisa & Shunki, 2018), el uso de un biodigestor a escala doméstica en los suburbios de Melbourne, Australia, que menciona el recuperar lo invertido en un lapso de cuatro años (Alexander et al., 2019), el estudio para la generación de biogás a partir de residuos de comida del hostel del Departamento de Energía, en M.P. India, donde se concluyó un retorno de inversión a los 4.5 años máximo de su puesta en marcha (Ananthakrishnan, Sudhakar, Goyal, & Sravan, 2013), una investigación sobre la factibilidad de usar métodos anaeróbicos en residuos sólidos orgánicos de tres escuelas de Florida, Estados Unidos (Wilkie, Graunke, & Cornejo , 2015), hasta llegar a escalas mayores como las que usan Disney para convertir sus residuos de comida en electricidad (Gunther, 2014).

Actualmente no existe una política de gestión de residuos sólidos orgánicos (RSO) en CETYS Universidad campus Mexicali, así como tampoco se cuenta con un registro de caracterización de los desechos orgánicos. Todos los días que opera el área de cocina de la cafetería se genera un impacto ambiental por la generación de RSO, es decir que por cada kilogramo de desechos de comida llevados al vertedero se generan alrededor de 4.2kg equivalentes de CO₂ (usando valores de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América).

Entre las ventajas que de hacer uso de la tecnología de digestión anaeróbica para la gestión de los RSO están:

- Se evita en un porcentaje el acarreo de RSO a los vertederos, lo que beneficia al medio ambiente y a la sociedad al disminuir las emisiones lixiviados al suelo y gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera.
- Beneficios económicos al propiciarse la economía circular haciendo uso de los residuos para generar energía térmica y de esta manera apoyar en reducir la facturación de gas L.P.
- Se aprovecha el subproducto que es en forma de biofertilizante, mismo que puede utilizarse dentro de los jardines de la institución.

Es fundamental llevar a cabo un estudio que nos permita observar de manera amplia y precisa, una perspectiva general de la situación que se presenta en el área de trabajo y así saber determinar las mejores acciones requeridas para el uso y manejo adecuado de los residuos que se generan.

El desarrollo de un modelo sustentable bajo un sistema de generación de biogás que emplee los residuos sólidos orgánicos, que ofrezca un proceso de generación estable, eficiente, de instalación y mantenimiento accesible provee una alternativa en el aprovechamiento de los recursos por una parte utilizando residuos orgánicos que de otra forman serían dispuestos en el relleno sanitario con todas las afectaciones que esto implica y por otra apoyaría a reducir la carga ambiental que supone el consumo de energía convencional.

1.4 Preguntas de investigación

La siguiente investigación es guiada por las siguientes preguntas:

- ¿De qué forma se pueden aprovechar los residuos sólidos orgánicos (desperdicios de comida) para generar energía?
- ¿Cuál será la cantidad de residuos sólidos orgánicos que genera el área de cafetería?
- ¿Cuál es el potencial de generación de biogás que se obtendría con los residuos de comida del área de cocina de cafetería?
- ¿Qué se requiere para desarrollar, diseñar y construir un digestor anaeróbico para residuos sólidos de comida, que genere un flujo constante de gas, sea de fácil instalación, manejo, mantenimiento, bajo costo y alta eficiencia?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es dimensionar un biodigestor que permita usar los residuos orgánicos desechados por la cafetería de CETYS Universidad, así como estimar el potencial que tienen para producir biogás a partir de la caracterización y análisis de los RSO.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar y conocer la cantidad y el tipo de residuos que se generan mediante un estudio de generación y caracterización.
2. Analizar las características físico-químicas de los residuos en un laboratorio para estimar el potencial de producción de biogás.
3. Dimensionar un biodigestor que se adapte a las condiciones de la cafetería.
4. Estimar la cantidad de gas por cada kg de residuo generado.

1.6 Hipótesis

Los residuos sólidos orgánicos que desecha la cafetería de CETYS Universidad producto de la elaboración de alimentos, tienen el potencial de producir 0.2 m³ de biogás por kilogramo.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Residuos

2.1.1 Definición

Los residuos se definen en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido, líquido o gaseoso y que contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme en lo dispuesto en la misma Ley (Diario Oficial de la Federación, 2003). En función de las características y orígenes de los residuos se les clasifica en tres grupos: residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

2.1.2 Residuos sólidos urbanos

Son aquellos que se generan en los domicilios particulares como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (i.e., productos de consumo y envases, embalajes, empaques), comercios, oficinas, instituciones, o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (Diario Oficial de la Federación, 2003).

La figura 6 nos indica, que el artículo 18 de la LGPGIR establece que los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en residuos orgánicos e inorgánicos con la finalidad de facilitar su separación de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos.

| Concepto | Definición |
|------------|--|
| Orgánico | Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo |
| Inorgánico | Residuo que por sus características químicas sufren una descomposición natural muy lenta o no son biodegradables |

Figura 6. Fuente: Art. 18 de la LGPIR.

Tanto los residuos sólidos como los peligrosos son una de las causas de problemas ambientales que se registran en las zonas urbanas y rurales de los municipios en gran medida por los manejos inadecuados de éstos, por lo que se procura cuidado para el manejo se da tanto en nuestros hogares, como en los lugares de trabajo. (Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de RSM, SEDESOL, 1996). Los residuos sólidos son aquellas sustancias, elementos sólidos u objetos materiales que son resultante de un consumo que el generador deja y que es susceptible a que se pueda aprovechar o transformar en un nuevo bien, un listado de observa en la figura 7.

| Residuos municipales | Origen |
|------------------------------|---|
| Residenciales | Casas individuales, edificios conjuntos y unidades residenciales, etc. |
| Comerciales | Restaurantes, hoteles, mercados, estaciones de servicio, talleres, etc. |
| Institucionales | Colegio, hospitales, cárceles, edificios gubernamentales, entre otros. |
| Construcciones, demoliciones | Escombros |
| Servicios municipales | Barrido de calles, mantenimiento de parques y plazas públicas, plantas de tratamiento de aguas residuales, etc. |
| Industriales | Pequeña, mediana y gran industria, actividades agroindustriales. |

Figura 7. Ejemplo de residuos municipales clasificado por sectores. (Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de RSM, SEDESOL, 1996).

El proceso de descomposición que ocurren en los residuos orgánicos es por medio de bacterias y otros microorganismos que generan subproductos, mismos que pueden ser nocivos para el ser humano y el medio ambiente, como lo son los gases que se emiten o lixiviados (Kofalusi & Aguilar, 2006).

2.1.3 Caracterización de RSU

Es un instrumento que nos permite obtener información relacionada a las características de los residuos sólidos. Se realiza a través de un estudio, en el cual se obtienen datos como: densidad, composición, cantidad, entre otros, en un determinado ámbito geográfico. La información que refleja el estudio de caracterización permite realizar una planificación técnica y operativa de los RSU; representa entonces una herramienta para la correcta gestión de los residuos y así permite tomar decisiones en la gestión integral de residuos sólidos a corto, mediano y largo plazo (Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos Municipales, 2018).

2.2 Biodigestión

2.2.1 Biodigestores

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es un contenedor hermético e impermeable en donde se deposita materia orgánica, en donde mediante un proceso de descomposición del material en ausencia de oxígeno, se genera biogás y abono orgánico. Pueden ser de hormigón armado (cemento), fosas sépticas estanques de agua, contenedores plásticos o de acero (CONAGUA, 2016). El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros gases en menores concentraciones que puede ser usado tanto para producir electricidad como para usarlo en sustitución del gas natural o LP. El abono orgánico es un subproducto también que es rico en nutrientes y que puede ser utilizado como un fertilizante o para mejorar suelos (Faith & Rivas, 2012).

En la figura 8 se observa datos que muestran una cantidad de biodigestores de diferentes tipos alrededor del mundo (Cheng, et al., 2014):

| Región | Cantidad de biodigestores |
|------------|---------------------------|
| China | 42 millones |
| India | 4.25 millones |
| Nepal | 260 mil |
| Bangladesh | 25 mi |
| Vietnam | 14 mil |
| Cambodia | 20 mil |
| Africa | 4 mil |
| América | 9 mil |

Figura 8. Cantidad de biodigestores alrededor del mundo, Cheng et al., 2014.

Este tipo de biodigestores convencionales se les denomina como “digestores de biogás domésticos” (DBD) haciendo referencia a (Cheng, et al., 2014). Este tipo de biodigestores por lo regular son fabricados in situ a base de concreto o ladrillos; pueden llegar a gotear y no pueden ser reparados con facilidad. En la actualidad se han manejado nuevos tipos usando materiales nuevos de construcción donde en contraste con los anteriores los PBD son fabricados en otro lugar con materiales que presentan propiedades físicas especiales.

Acorde a los datos proporcionados por Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás A.C. (AMBB), la figura 9 muestra las principales aplicaciones para biodigestores en México son (Linnenberg, 2015):

| Área | Aplicaciones |
|------------------------------|--|
| Industria | Papelera, ingenios, producción de alimentos, licorera, orgánica y rastros. |
| Agricultura | Bio-reactores, granjas lecheras, ganado bovino, porcícola, aviar. |
| Rellenos sanitarios | Plantas de manejo RSU, generación de electricidad, mejoramiento de biogás. |
| Tratamiento de agua residual | Tratamiento de lodos para producción de biogás. |

Figura 9. Principales aplicaciones para biodigestores en México, Linnenberg, 2015.

2.2.2 Biogás

El biogás es el gas producido durante el proceso de fermentación anaerobia (sin presencia de oxígeno) de la fracción orgánica de los residuos. Está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de Carbono (CO₂), además de otros gases en cantidades menores (CIEMAT, 2012), en la figura 10 se menciona la composición de gases del biogás. Cuando los desechos orgánicos inician el proceso químico de fermentación (pudrimiento), liberan una cantidad de gases llamados biogás. Haciendo uso de herramientas y de la manera apropiada, el biogás se puede transformar en otros tipos de energía, como calor, electricidad o energía mecánica.

| Gas | Fórmula química | Volumen (%) |
|----------------------|------------------|-------------|
| Metano | CH ₄ | 60-70 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 30-40 |
| Hidrógeno | H ₂ S | 1.0 |
| Nitrógeno | N ₂ | 0.5 |
| Sulfuro de hidrógeno | H ₂ S | 0.1 |
| Oxígeno | O ₂ | 0.1 |
| Monóxido de carbono | CO | 0.1 |

Figura 10. Composición de gases del biogás, (Cheng et al., 2014)

Al momento de disponer de los desechos orgánicos, que necesariamente deben estar en estado anaeróbico, las bacterias metanogénicas consumen el carbono y el nitrógeno de los desechos dispuestos y como resultado de esta digestión, mediante la fermentación y digestión, se produce el biogás. Los desechos que sí podemos utilizar en un biodigestor pueden ser: restos vegetales, papeles, restos de césped, cáscaras de vegetales, fideos, papas, restos de comida, excretas humanas y de animales. (Chispa orgánica, Brito 2012)

2.2.3 Biodigestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H_2 O_2). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. (Varnero, 2011)

Para que el proceso de fermentación se realice en forma normal, se tienen presentes a cuatro grupos de bacterias que tienen diferentes funciones catabólicas sobre el carbono en el proceso de degradación de la materia hasta llegar al CH_4 que son los siguientes:

- a) Bacterias Hidrolíticas (fermentativas): Catabolizan sacáridos, proteínas, lípidos y otros contribuyentes menores de biomasa.
- b) Bacterias acetogénicas: Productoras de hidrógeno, catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.
- c) Bacterias homoacetogénicas: Catabolizan compuestos mono carbonados y/o hidrolizan compuestos multicarbonos hacia la producción de ácidos acéticos.
- d) Bacterias metanogénicas: Catabolizan acetatos compuestos mono carbonados para producir metano, contemplándose solo cuatro géneros.

El exceso o falta de cualquier tipo de bacteria, así como la actividad menor o mayor de cualquiera de estas, propiciarán un resultado de desequilibrio que derivará a la anormalidad o el fracaso del proceso de fermentación (Varnero, 2011).

2.2.4 Etapas del proceso de biodigestión

La guía sobre el biogás y los biodigestores (FAO, 2019) resume las etapas donde ocurren las reacciones dentro del biodigestor de la siguiente forma:

Hidrólisis

Se encuentra la materia orgánica compleja (como son los lípidos, proteínas, hidratos de carbono, etc.), es degradada por medio de microorganismos en materia orgánica soluble (ácidos grasos, aminoácidos, azúcares), un sustrato listo para la siguiente etapa.

Acidogénesis (fermentativa) y acetogénesis

Varios grupos de microorganismos llamados acidogénicos y acetogénicos, procesan el sustrato de la etapa anterior y liberan principalmente hidrógeno, dióxido de carbono y acetato. Debido a que esta etapa es la más rápida en todo el proceso de biodigestión, es primordial controlar que los niveles de pH descieran provocando un entorno ácido (acidificación) e interfiera con la acción del consorcio microbiano.

Metanogénesis

Finalmente, en esta última etapa los microorganismos metanogénicos tienen dos vías metabólicas diferentes: una de ellas es la vía acetoclástica, que transforma el ácido acético en metano y dióxido de carbono; la vía hidrogenotrófica, genera metano a partir del hidrógeno y el dióxido de carbono.

La figura 11 muestra un esquema de las etapas del proceso de biodigestión antes descritas. Los números sobre la imagen (1 al 5) representan la población bacteriana que son las que siguen en ese orden: bacterias fermentativas, acetogénicas, homoacetogénicas, metanogénicas hidrogenotróficas y metanogénicas acetoclásticas.

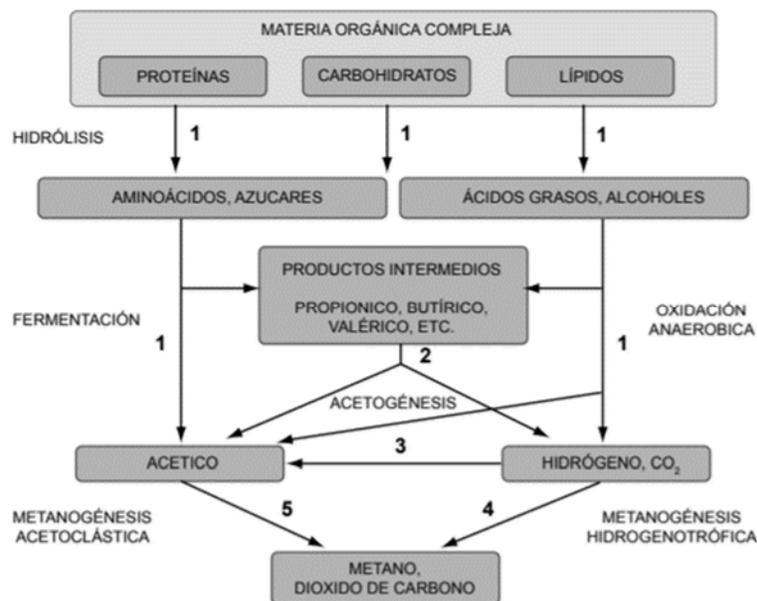


Figura 11. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica, (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991)

2.2.5 Parámetros a considerar en proceso de biodigestión

De acuerdo a (Varnero, 2011), existen factores que influyen directamente en la formación de la fase metanogénica y son capaces de modificar la descomposición como lo son los siguientes:

Concentración de carga

No es conveniente que se encuentre muy concentrada o muy diluida, esto para la producción de gas, efluentes y operación del reactor en general. Teniendo en cuenta el proceso de digestión anaeróbica, la proporción es 1:1, es decir, la mezcla de un kilogramo de excreta fresca con un litro de agua (Char, 2001). El agua caliente puede ayudar a disolver mejor la excreta y obtener una mejor solución.

Temperatura

Es uno de los factores de mayor importancia dentro del proceso anaeróbico, de esta manera se definen las zonas en la que el proceso se puede llevar a cabo, tanto por latitud y/o altura. También la temperatura es vista como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas. (Contreras, 2006).

La temperatura afecta el tiempo de retención para la digestión del material dentro del digestor, esto es factor determinante en la velocidad de degradación de la materia orgánica, entre más alta sea la temperatura más se aceleran las tasas de reacción química y biológica. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables, que a su vez es dependiente de la temperatura.

Se distinguen tres rangos de temperaturas definidos dentro del proceso anaeróbico:

- a) Una digestión Psicofílica: La producción de gas varía de una estación a otra dependiendo de la temperatura atmosférica, tiene las ventajas de que sus estructuras son simples y de baja inversión.
- b) Digestión Mesofílica: La descomposición de la carga es más lenta que la termofílica, pero con menos consumo de energía.
- c) Digestión Termofílica: Se caracteriza por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y corto tiempo de retención, tiene buenas características de desinfección.

La figura 12 y 13, muestran los tres tipos de temperatura (mínimo, óptimo y máximo) del proceso de fermentación, así como la sensibilidad y rango de temperatura en las que operan las bacterias.

| Fermentación | Mínimo | Óptimo | Máximo |
|---------------|---------|---------|---------|
| Psicrofílicas | 4-10°C | 15-18°C | 25-30°C |
| Mesofílicas | 15-20°C | 34-38°C | 40-45°C |
| Promedio | 17.5°C | 36°C | 42.5°C |
| Termofílicas | >40°C | 50-60°C | 75-80°C |

Figura 12. Valores mínimos, óptimos y máximos de temperatura en el proceso de fermentación, (Varnero, 2011)

| Bacterias | Rango de temperaturas | Sensibilidad |
|---------------|-----------------------|----------------|
| Psicrofílicas | < 20°C | +/- 2°C/hora |
| Mesofílicas | 20°C - 40°C | +/- 1°C/hora |
| Termofílicas | > 40°C | +/- 0.5°C/hora |

Figura 13. Rango de temperatura de las bacterias y su sensibilidad. (Varnero, 2011)

Tiempo de retención hidráulica.

Dentro de los digestores continuos o semicontinuos el tiempo de retención hidráulica (TRH) se define como el valor en días entre la división del volumen del biodigestor y el volumen de la carga diaria. (Moncayo, 2008)

El TRH se encuentra ligado a dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. Si se selecciona una mayor temperatura esto implicará ver disminuido el TRH lo que produce como consecuencia un menor volumen del biodigestor para diferir un volumen determinado de material orgánico (Varnero, 2011).

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el TRH, ya varían los volúmenes, el control de calor y la eficiencia. En relación al tipo de sustrato, por lo regular los materiales que poseen mayor proporción de carbono en moléculas fuertes como por ejemplo la celulosa, van a demandar mayores TRH para ser digeridos en su totalidad (Varnero, 2011).

Valor de Ph

El valor óptimo en la etapa metanogénica es un rango de entre 6.5-7.5, cuando baja de 6.4 o sube de 7.6, puede inhibir el proceso de fermentación o hasta detenerlo como se muestra en la figura 14. Existen formas para poder corregir el nivel de pH de forma práctica de la siguiente manera: Sacando frecuentemente una pequeña cantidad de efluente y agregando materias primas frescas en la misma cantidad y en forma simultánea. También, cuando el pH es bajo se puede agregar fertilizante, cenizas, agua

amoniacal diluida, hidróxido de calcio o una mezcla de ambos y licor fermentado. Y si el pH es alto de puede agregar algunos de los siguientes elementos: Azufre en polvo: 150 a 250 g/m³, Sulfato de Hierro 1 a 3 g/m³, aspirina, (ácido acetilsalicílico). (Vásquez & Riveros, 2013)

| Valor pH | Características |
|-----------|---------------------|
| 6.5 - 7.5 | Óptimo |
| < 6.4 | Retardo por ácidos |
| >7.6 | Retardo por amonios |

Figura 14. Características de acuerdo al pH del efluente, (Vásquez y Riveros, 2013.)

Con esto concluye la parte correspondiente al capítulo 2 de esta investigación dando paso al siguiente, donde se explica la metodología a seguir para realizar el trabajo de investigación.

Capítulo 3: Metodología

Esta investigación se desarrolló en la cafetería de CETYS Universidad, situada en 32° 39' 18.533" latitud norte y 115° 24' 36.198" longitud oeste, misma que se ubica en el municipio de Mexicali, Baja California (Google, 2020). (Figura 15)



Figura 15. Ubicación de la cafetería de Cetys Universidad. Google Maps, s.f.

El campus cuenta con una superficie de 51.36 hectáreas y de acuerdo a los datos de la propia institución educativa a enero del año 2020, se contó con una población total de 8,329 personas, entre las que se encuentran personal técnico, administrativo, docente y toda la comunidad estudiantil.

El objeto de estudio de este proyecto es dimensionar un biodigestor que permita, a partir del estudio de generación de la caracterización y análisis de los residuos sólidos orgánicos desechados por la cafetería de CETYS Universidad, producir energía térmica. Los RSO que se estudiaron fueron aquellos desechados por el personal del área de cocina de la cafetería, producto de la elaboración de alimentos que ahí se venden (incluyen procesados y sin procesar), por lo que no se consideran los restos de alimentos generados por los comensales o personas que adquieren comida en el establecimiento. Para desarrollar la investigación la metodología a seguir fue la siguiente:

1. Estudio de generación y caracterización de RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad.
2. Análisis físico-químico de los RSO.

3. Dimensionamiento teórico de biodigestor para RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad.
4. Estimación teórica de producción de biogás.

3.1 Generación y caracterización de RSO en cafetería de CETYS Universidad.

Para realizar los trabajos de este punto se conversó y se llegó a un acuerdo con el personal encargado del área de cafetería para que los empleados que laboran en la preparación de alimentos del área de cocina segregaran los residuos orgánicos de los inorgánicos, una vez separados y puestos en bolsas diferentes, los empleados pondrían las bolsas objeto de estudio en un contenedor especial (diferente al que usan para desechar toda la demás basura en general) con la finalidad de apoyar en reducir el tiempo de estudio de generación y caracterización de los RSO. En la figura 16 se muestran los contenedores de residuos modelo 1316-41 para el acopio de la basura en general y la figura 17 se muestra el contenedor especial que consistió en una caja de plástico donde se depositaron las bolsas de residuos previamente segregadas.



Figura 16. Contenedor para residuos generales.



Figura 17. Contenedor especial para bolsa de basura segregada.

El estudio consistió en tres etapas principales:

1. Definición de fecha y hora para realizar el estudio.
2. Estimación de la generación diaria de los RSO.
3. Muestreo, caracterización de los RSO y captura de datos.

3.1.1 Definición de fecha y hora.

Inicialmente se contempló realizar un estudio durante cada estación del año, pero debido a las circunstancias actuales a nivel mundial por concepto de la pandemia de enfermedad por coronavirus 2019-2020, sólo fue posible realizar el estudio en dos fechas:

1. Periodo de otoño: Los trabajos se realizaron veinte días del mes de octubre del año 2019.
2. Periodo de invierno: Los trabajos se realizaron durante veinte días entre los meses febrero y marzo del año 2020.

Los días en específico en que se realizó el estudio fueron de acuerdo a los días marcados en amarillo, como lo muestra la figura 18.

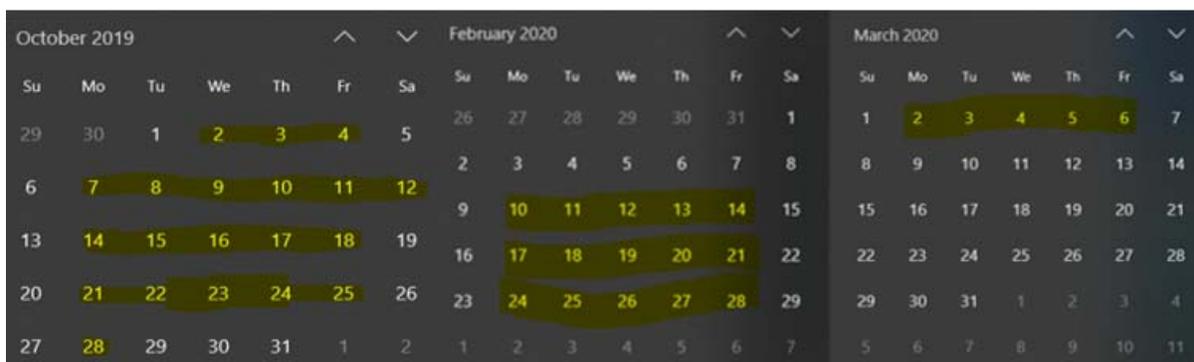


Figura 18. Días en que se realizó el estudio de caracterización.

Para obtener el total de residuos diarios fue necesario esperar hasta el final de la jornada laboral del personal de cocina de cafetería; por lo anterior, el horario de estudio de los residuos se situó entre las 20:00 y 21:00 horas en adelante.

3.1.2 Estimación de la generación diaria de los RSO.

Para estimar la cantidad diaria de residuos se usó un dinamómetro de gancho con capacidad de 200kg, modelo SF-910, con un margen de error de +/- 0.05kg. El equipo se suspendió, haciendo uso de una cuerda de nylon, de un marco metálico, como se muestra en la figura 19.



Figura 19. Dinamómetro utilizado para determinar el peso de la bolsa de RSO.

Una vez suspendido el equipo en el marco metálico, se encendió y seleccionó la unidad de lectura (kg), posteriormente se presionó el botón de “tare” para calibrar a cero el dinamómetro y después se colgó la bolsa en el gancho a manera de quedar suspendida. Mientras la lectura variaba por el movimiento que ocasionó la colocación de la bolsa, se esperó hasta que la bolsa permaneciera fija para tomar la lectura. El procedimiento se repitió hasta en tres ocasiones con cada una de las bolsas que fueron objeto de este estudio para asegurar la confiabilidad de la lectura. Un ejemplo de lectura de una de las bolsas se muestra en la figura 20.



Figura 20. Ejemplo de toma de lectura al pesar una bolsa en el dinamómetro.

3.1.3 Muestreo, caracterización y captura de datos.

El tamaño de la población se definió como todos los residuos sólidos orgánicos generados por la cocina de cafetería depositados en bolsas de plástico negra y colocadas dentro del contenedor especial. La norma mexicana NMX-AA-15-1985, establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis de laboratorio, sin embargo, se decidió muestrear el total de los residuos que se encontraron diariamente en las bolsas de plástico. Una vez que se tomaba la lectura del peso de la bolsa con el dinamómetro, se procedió como a continuación se describe:

1. Se extendió una lona de plástico negra de 2x2m en el piso y sobre de ella se colocó la bolsa de plástico que contenía los RSO, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Bolsa de residuos sobre lona de plástico de 2x2m.

2. Se abrió la bolsa para caracterizar el contenido a razón de enlistar los subproductos de acuerdo a la clasificación enmarcada por la norma NMX-AA-022,

con la variante de clasificar el residuo de acuerdo a su tipo y se empezó a separar los residuos de acuerdo a su tipo (e.g. zanahoria, piña, pepino, melón, etc.), como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. a) Bolsa con residuos mixtos dentro de ella. b) Residuos separados por su tipo.

3. Cuando los residuos quedaron separados, se usó un recipiente hondo donde con la ayuda de una báscula digital modelo, MS45-041-546-10, se pesó cada tipo de residuo y se registró. El peso máximo de lectura de la báscula es de 5kg, por lo que, si el residuo llegó a pesar más, se repetía el proceso hasta contabilizarlo todo. Un ejemplo se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Residuo de pepino siendo pesado en la báscula digital.

Para obtener una muestra representativa para posterior análisis en laboratorio de los residuos que se caracterizaron, se escogió un día al azar de cada semana y en ese día al finalizar la caracterización se apartó una muestra de un kilo proporcional al tamaño de la población, como se observa en la Figura 24. La muestra se guardó en un congelador. Después de realizar la caracterización, los residuos fueron depositados nuevamente en bolsas de plástico negras de 33 galones y éstas a su vez se colocaron dentro de los contenedores exclusivos del área de cafetería.



Figura 24. Ejemplo de la muestra que fue refrigerada para posterior análisis.

3.2 Análisis físico-químico de los RSO.

Los residuos analizados en el laboratorio fueron los obtenidos en el periodo de otoño, debido a la pandemia del coronavirus 2019-2020, el programa de análisis de laboratorio para los residuos de inviernos fue cancelado. Los residuos analizados fueron previamente sometidos a un pretratamiento mecánico el cual consistió en cortar con cuchillo los residuos en trozos pequeños, posteriormente se usó una batidora para tritarlos y obtener una mezcla homogénea. En todo momento durante la realización de los análisis a los residuos se utilizó equipo de protección como bata de seguridad, lentes de protección, cubre bocas y guantes de látex.

Para conocer las características físico-químicas de las muestras de residuos, se tomaron en cuenta los parámetros que incluyen en el proceso de digestión anaeróbica, los cuales se enlistan como siguen:

1. Densidad.
2. Potencial de hidrógeno (pH).

3. Humedad.
4. Sólidos totales (ST).
5. Sólidos volátiles (SV).
6. Sólidos fijos (SF).
7. Demanda química de oxígeno (DQO).

3.2.1 Densidad

La densidad se determinó haciendo uso de tubos centrífugos cónicos graduados con tapa de 50 ml de capacidad y una balanza analítica digital marca Ohaus, modelo SP602 Scout Pro. Una vez calibrada la balanza, se pesa el tubo vacío como se muestra en la Figura 25 y se toma el registro.



Figura 25. Lectura del peso del tubo vacío en la balanza.

Una vez que se pesó el recipiente vacío, se añadió la muestra del residuo orgánico del estudio de caracterización hasta llegar a los 50ml del recipiente, se aseguró que el residuo estuviera compactado y uniforme dentro del envase. Posteriormente se colocó el tubo lleno del residuo en la balanza y se tomó lectura como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Lectura del tubo con muestra de residuo en la balanza.

La densidad se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{P_1 - P_0}{V} \quad (\text{ec. 1})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_1 = Peso del recipiente con el residuo.

V = Volumen ocupado por el residuo dentro del recipiente.

3.2.2 Potencial de hidrógeno (pH)

La medición del pH se determinó haciendo uso de un instrumento de medición de pH marca Hach, modelo Pocket Pro, un agitador magnético, un vaso de precipitado de 200ml y tiras indicadoras de pH marca MColorpHast, en base a la norma NMX-AA-25-1984 y el manual de operación del potenciómetro. El equipo se calibró con apoyo de soluciones amortiguadoras de pH=4.0, pH=7.0, pH=10.0 antes de usarse.

Se diluyó una pequeña cantidad (10gr) de la primera muestra en 90ml de agua destilada en un vaso de precipitado. Dentro del vaso, se colocó un imán con pivote de giro para agitador magnético de 20mm de largo y el vaso sobre el agitador. Se mezcló durante 10 minutos para luego reposar durante 30 minutos. Antes de tomar la lectura, se limpió el sensor del potenciómetro con agua destilada, después se agregó la mezcla dentro del depósito de medición del equipo hasta el nivel marcado por una línea, se colocó encima el potenciómetro y se tomó lectura como se muestra en la figura 27.



Figura 27. Lectura del equipo de medición de pH.

La segunda forma de medir el pH de las muestras fue mediante las tiras indicadoras de pH. La tira se sumergió unos segundos dentro del vaso precipitado que contenía la mezcla. Una vez retirada, la tira mostró los valores de acuerdo a la escala de colores indicados en el mismo empaque, como se muestra en la figura 28. Esto se repitió con cada una de las demás muestras.



Figura 28. Lectura que muestra el pH de la mezcla.

3.2.3 Humedad

Para obtener el valor de humedad se tomaron tres crisoles de porcelana de 100ml cada uno y se colocaron en un horno análogo marca Arsa a 120°C por 2 horas como se muestra en la figura 29.



Figura 29. Crisoles dentro del horno análogo.

Se dejaron secar en un desecador a temperatura ambiente. El proceso se repitió hasta obtener un peso constante de las cápsulas; el peso se determinó usando una balanza analítica con sensibilidad de 0.0001g, marca OHAUS, como se muestra en la figura 30.



Figura 30. Lectura del peso del crisol en la balanza analítica.

Se depositaron 50 ml de cada muestra en cada crisol (ver figura 31) y se dejaban en el horno por un lapso de 4 horas. Se dejaban enfriar dentro del desecador, se pesaba y se repetía el proceso hasta obtener un valor constante. El procedimiento se determinó en base a la norma NMX-AA-16-1984.



Figura 31. Crisol con muestra del residuo #1.

El porcentaje de humedad se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (H)} = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} \right) \cdot 100 \quad (\text{ec. 2})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_1 = Peso del recipiente con el residuo húmedo.

P_2 = Peso del recipiente con el residuo seco.

3.2.4 Sólidos Totales (ST)

Para obtener la cantidad de sólidos totales, se usaron 3 crisoles de porcelana de 100ml cada uno, se introdujeron en una mufla eléctrica digital, marca Felisa a una temperatura de 550°C por 20 minutos, después se introdujeron los crisoles al horno a una temperatura de 105°C durante 20 minutos, terminado el tiempo, los crisoles fueron transferidos a un desecador. Pasados 20 minutos dentro del desecador, se tomaron los crisoles y se pesaron en la balanza analítica para registrar el peso de cada uno, esto se repitió hasta dos veces cuando no hubo variación mayor a 0.0005g.

Se colocó una cantidad de 100ml de cada una de las muestras en cada crisol, las cápsulas se colocaron después dentro del horno y se llevaron a la sequedad a una temperatura de 105°C durante 24 horas (figura 32).



Figura 32. Crisoles con muestras dentro del horno.

Una vez que pasaron las 24 horas, se sacaron los crisoles y se introdujeron dentro del desecador por 30 minutos, se llevaron a la báscula analítica cada uno y se registró su peso. El procedimiento se determinó con base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015.

El contenido de sólidos totales se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos Totales (ST)} = \left(\frac{P_1 - P_0}{V} \right) \quad (\text{ec. 3})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_1 = Peso del recipiente con el residuo seco.

V = Volumen de la muestra.

3.2.5 Sólidos Volátiles (SV):

Para obtener la cantidad de los sólidos volátiles se utilizaron los crisoles con el residuo seco (figura 33) que se utilizó para determinar los ST, se introdujeron en la mufla eléctrica digital a una temperatura de 550 °C durante 20 minutos. Se dejaron enfriar y se pasaron al desecador para posteriormente registrar su peso. Se determinó con base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015.



Figura 33. Crisoles con residuo seco listas para ser introducidas a la mufla.

El contenido de sólidos volátiles se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos Volátiles (SV)} = \left(\frac{P_1 - P_2}{V} \right) \quad (\text{ec. 4})$$

Dónde:

P_1 = Peso del recipiente con el residuo seco.

P_2 = Peso del recipiente con el residuo incinerado.

V = Volumen de la muestra.

El porcentaje de sólidos volátiles se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sólidos Volátiles (\%SV)} = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} \right) \cdot 100 \quad (\text{ec. 5})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_1 = Peso del recipiente con el residuo seco.

P_2 = Peso del recipiente con el residuo incinerado.

V = Volumen de la muestra.

3.2.6. Sólidos Fijos (SF)

Para obtener la cantidad de sólidos fijos se utilizan las muestras calcinadas (figura 34) y se determinan con base a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos Fijos (SF)} = \left(\frac{P_2 - P_0}{V} \right) \quad (\text{ec. 6})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_2 = Peso del recipiente con el residuo incinerado.

V = Volumen de la muestra.



Figura 34. Ejemplo de crisol con residuo incinerado.

El porcentaje de cenizas se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas } (\%C) = \left(\frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \right) \cdot 100 \quad (\text{ec. 7})$$

Dónde:

P_0 = Peso del recipiente vacío.

P_1 = Peso del recipiente con el residuo seco.

P_2 = Peso del recipiente con el residuo incinerado.

V = Volumen de la muestra.

3.2.7 Demanda química de oxígeno (DQO):

Para determinar la Demanda química de oxígeno se requirió una licuadora, una pipeta serológica de 2ml, agitador magnético, vaso de precipitado de 1000 y 200ml, reactor DRB 200, colorímetro DR/890, gradilla y reactivos de digestión de rango extra alto 0-15,000 mg/L (viales). El procedimiento y análisis fue basado en el método Hach 800, aprobado por la US-EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América).

Una porción de 10ml (Figura 35) de cada muestra fueron diluidas en 990ml de agua en un vaso de precipitado de 1000ml. Se licuó (Figura 36) y después se vertió una cantidad al vaso de 200ml para ser agitada en el agitador magnético (Figura 37).

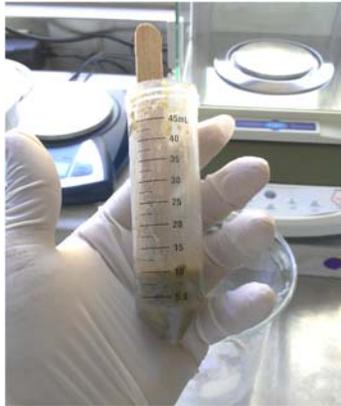


Figura 35. Porción de 10ml de una muestra.



Figura 36. Porción de 10ml con 990ml de agua añadida en licuadora.



Figura 37. Vaso de 200ml con mezcla en agitador magnético.

Se tomó una muestra de 0.2ml con una pipeta serológica y se introdujo en el vial (Figura 38) que contiene el reactivo; a un cuarto vial se le introdujo 0.2ml de agua destilada (a éste se le llama “blanco”, necesario para la lectura en el colorímetro de acuerdo al procedimiento). Los viales se mantuvieron en posición vertical y suavemente se invirtió su posición (arriba y abajo) varias veces para mezclar el contenido.



Figura 38. Viales con reactivo para digestión.

Se usó un reactor DRB 200, marcha Hach, que se precalentó hasta llegar a los 150°C, para después introducir los viales con las muestras dentro (incluyendo el “blanco”) y se programa el reactor para calentar los viales por un periodo de 2 horas. Una vez que terminó el programa dentro del reactor, se esperó a que los viales llegaran a una temperatura de 120°C, se retiraron del reactor y se invertían varias veces hasta después colocarlos en una rejilla en espera de que se hubieren enfriado a temperatura ambiente. Antes de ingresar los viales dentro del colorímetro DR/890, se aseguró que éstos

estuvieran libres de cualquier mancha. Primeramente, se introdujo el programa en el colorímetro para medir un rango alto de DQO, se colocó el vial blanco y se calibró. Se retiró el vial blanco y se colocó el vial de la primera muestra, se tomó lectura (Figura 39). El procedimiento se repitió con cada una de las muestras en los viales.



Figura 39. Lectura del colorímetro con vial dentro.

De acuerdo al procedimiento, al resultado obtenido se le debe de multiplicar por 10 veces, siendo éste el resultado final de DQO presente en la muestra. Si el residuo se diluyó, el resultado también debe de multiplicarse por la cantidad de veces que se haya diluido el residuo. La cantidad de veces que se diluyó el residuo se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{No. de veces que se diluyó la muestra } (n) = \left(\frac{V_m + V_a}{V_m} \right) \quad (\text{ec. 8})$$

Dónde:

V_m = Volumen de la muestra de RSO.

V_a = Volumen del agua usada para diluir la muestra.

3.3 Dimensionamiento teórico de biodigestor para RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad

Los cálculos para el dimensionamiento del biodigestor se realizaron de acuerdo a la metodología empleada por (Kigozi, Aboyade, & Muzenda, 2014), haciendo uso de valores obtenidos en el estudio físico-químico de las muestras, como se indica a continuación:

1. Cálculo del volumen del reactor.

2. Cálculo del volumen del contenedor de biogás.
3. Cálculo del volumen total del biodigestor.

3.3.1 Cálculo del volumen del reactor

El volumen del reactor se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen del reactor}(V_r) = Q \cdot \text{TRH} \quad (\text{ec. 9})$$

Dónde:

Q= Flujo volumétrico de alimentación al digestor expresado en m³/día.

TRH= Tiempo de retención hidráulica expresado en días.

Para obtener Q se dividió el promedio de generación de RSO diario entre el promedio de las densidades que se obtuvo de las muestras y se determinó como sigue:

$$\text{Flujo volumétrico}(Q) = \frac{\text{RSO}_d}{\rho} \quad (\text{ec. 10})$$

Dónde:

RSO_d= Residuo sólido orgánico expresado en kg/día.

ρ= Densidad del RSO expresado en kg/m³.

Al resultado obtenido de Q, se añadió una cantidad de agua en una proporción de 1:1 con la finalidad de lograr fluidez del substrato. De la literatura revisada por (Kigozi, Aboyade, & Muzenda, 2014), el TRH se encuentra en un rango de entre 21-30 días, (Pham Van, Fujiwara, Leu Tho, Son Toan, & Hoang Minh, 2019) menciona que comúnmente para sistemas de una etapa a temperatura mesofílica, el TRH es de 30 días. Para efectos del cálculo se utilizó el límite superior, es decir 30 días de TRH.

Para obtener la velocidad de carga orgánica se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad de carga orgánica}(VCO) = \frac{(Q \cdot \text{CSV})}{V_r} \quad (\text{ec. 11})$$

Dónde:

Q= Flujo volumétrico expresado en m³/día.

CSV= Concentración de sólidos volátiles de la carga expresado en kg/m³.

V_r= Volumen del reactor expresado en m³.

3.3.2 Cálculo del volumen del contenedor de biogás.

El volumen del contenedor de biogás se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen del contenedor de biogás}(V_g) = \frac{V_r}{2} \quad (\text{ec. 12})$$

Dónde:

Q= Flujo volumétrico expresado en m³/día.

CVS= Concentración de sólidos volátiles de la carga expresado en kg/m³.

V_r= Volumen del reactor expresado en m³.

3.3.3 Cálculo del volumen total del biodigestor.

El volumen total del biodigestor se expresa de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen total del biodigestor}(V_t) = V_r + V_g \quad (\text{ec. 13})$$

Dónde:

V_r= Volumen del reactor expresado en m³.

V_g= Volumen del contenedor de biogás expresado en m³.

3.4 Estimación teórica de producción de biogás de los RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad

Para realizar una estimación teórica de producción de biogás por kg de RSO, se realizó una revisión de la literatura de los rendimientos de biogás determinados experimentalmente, como lo proponen (Curry & Pillay, 2012) haciendo uso de los valores de %SV y el porcentaje de residuo seco de cada muestra como lo propone (Yang, Bao, & Xie, 2018), en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Potencial de producción de biogás}(PB) = \%SV_M \cdot \%RS_M \cdot RB \quad (\text{ec. 14})$$

Dónde:

%SV_M= Porcentaje de sólidos volátiles contenidos en las muestras (ya sea M₁, M₂, o M₃)

%RS_M= Porcentaje de residuo seco (ya sea M₁, M₂ o M₃).

RB = Rendimiento de biogás (valor promedio tomado de la literatura) expresado en m³/kg SV.

El valor de rendimiento de biogás a partir de los sólidos volátiles fue tomado haciendo un promedio de los valores registrados en el trabajo de Curry, N, et al, 2012, los obtenidos en el estudio de (Bong, et al., 2018); en éstos últimos se encuentran registros de residuos de comida de cafeterías de 12 universidades, así como también de cocinas domésticas, compañías recicladoras y central de abastos, valores obtenidos en países como China, México, Irlanda, Pakistán, Japón, Reino Unido y Corea.

Capítulo 4: Resultados

4.1 Estudio de generación de residuos sólidos.

Durante el estudio de caracterización realizado, se encontró que el total de residuos encontrados en las bolsas de basura que el personal de la cafetería de CETYS campus Mexicali generó durante 39 días en los periodos de otoño del año 2019 y de invierno del año 2020, asciende a 499.63kg (1.54×10^{-3} per cápita) y se encontró compuesto por residuos orgánicos e inorgánicos, 98% y 2% respectivamente. La figura 40 muestra los porcentajes obtenidos de acuerdo a cada periodo.



Figura 40. Gráficas que presentan la distribución del tipo de residuo obtenido en las temporadas.

Una vez separados y caracterizados los residuos, se dividieron en tres clasificaciones: orgánico sin procesar, orgánico procesado y finalmente como inorgánico. El resultado obtenido se muestra en las figuras 41 y 42.

| Orgánico - Sin procesar | | Orgánico - Procesado | | Inorgánico | |
|-------------------------|--------------|----------------------|--------------|------------|--------------|
| Tipo | Cantidad (g) | Tipo | Cantidad (g) | Tipo | Cantidad (g) |
| Limón | 1,322 | Carne de res cocida | 30 | Plástico | 602 |
| Tomate | 1,200 | Queso amarillo | 27 | Papel cera | 225 |
| Olotes | 171 | Pan | 9,770 | Papel | 1,129 |
| Cebolla | 2,807 | Frijoles cocidos | 13,573 | Cartón | 98 |
| Pepino | 22,515 | Arroz cocido | 5,200 | Tetrapack | 764 |
| Lechuga | 18,105 | Pollo cocido | 433 | Aluminio | 400 |
| Melón | 32,321 | Tortilla harina | 181 | foam | 21 |
| Piña | 75,482 | Café molido | 826 | | |
| Huevo | 2,037 | Pescado | 140 | | |
| Papaya | 48,557 | Carne pollo | 14,829 | | |
| Mango | 178 | Peperoni | 5 | | |
| Zanahoria | 10,323 | Pasta | 16,226 | | |
| Jícama | 240 | Tortilla de maiz | 3,735 | | |
| Fresas | 855 | | | | |
| Repollo | 1,565 | | | | |
| Papa | 2,964 | | | | |
| Chile jalapeño | 274 | | | | |
| Kiwi | 243 | | | | |
| Chile morrón | 2,707 | | | | |
| Rabanos | 352 | | | | |
| tocino | 264 | | | | |
| Manzana | 397 | | | | |
| Pera | 839 | | | | |

Figura 41. Clasificación de los residuos producto de la caracterización de otoño 2019.

| Orgánico - Sin procesar | | Orgánico - Procesado | | Inorgánico | |
|-------------------------|--------------|----------------------|--------------|------------|--------------|
| Tipo | Cantidad (g) | Tipo | Cantidad (g) | Tipo | Cantidad (g) |
| Limón | 350 | Pan | 2,456 | Plástico | 1,322 |
| Tomate | 5,810 | Frijoles cocidos | 3,345 | Papel | 845 |
| Cebolla | 4,440 | Arroz cocido | 890 | Cartón | 1,395 |
| Pepino | 42,730 | Tortilla harina | 32 | Tetrapack | 552 |
| Lechuga | 12,830 | Café molido | 552 | Aluminio | 4,182 |
| Melón | 24,330 | Pasta | 8,126 | | |
| Piña | 58,360 | Tortilla de maíz | 1,980 | | |
| Papaya | 14,780 | | | | |
| Zanahoria | 8,790 | | | | |
| Papa | 1,780 | | | | |
| Chile Jalapeño | 180 | | | | |
| Chile Morrón | 2,650 | | | | |
| Manzana | 2,992 | | | | |

Figura 42. Clasificación de los residuos producto de la caracterización de invierno 2020.

Siendo el área de interés los residuos sólidos orgánicos, de los datos que se mostraron en las figuras 37 y 38, se desprendieron los porcentajes que representan únicamente los residuos clasificados como procesados y sin procesar, de acuerdo a la figura 43.



Figura 43. Distribución de los residuos clasificados como Procesados y Sin Procesar.

Durante las últimas tres semanas del mes de octubre se obtuvieron tres muestras (de 1 kg cada una) que posteriormente se analizaron en un laboratorio; cada una se obtuvo en un día aleatorio (una por semana) y se nombraron como M₁, M₂ Y M₃. Estas muestras se sacaron en proporción del total del residuo que había en el día de su obtención y la cantidad de masa llevada a laboratorio, fue sugerida para que alcanzara para todos los análisis. El porcentaje de acuerdo a la clasificación de cada uno de los residuos de las tres muestras se describen en la figura 44, donde los porcentajes contenidos en las celdas color blanco representan RSO sin procesar y los contenidos en las celdas color gris, los RSO procesados.

| Muestra 1 (M ₁) | | Muestra 2 (M ₂) | | Muestra 3 (M ₃) | |
|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| Tipo | % | Tipo | % | Tipo | % |
| Melón | 19.71 | Zanahoria | 1.00 | Zanahoria | 4.99 |
| Papaya | 23.12 | Lechuga | 2.22 | Chile Morron | 10.17 |
| Lechuga | 5.11 | Tocino | 1.00 | Chile Jalapeño | 0.74 |
| Papa | 4.87 | Manzana | 1.11 | Cebolla | 0.55 |
| Pan | 1.22 | Pera | 3.11 | Totopos | 1.71 |
| Frijoles | 17.52 | Pasta | 31.70 | Limón | 3.51 |
| Piña | 27.73 | Pollo | 54.06 | Pollo | 8.87 |
| Tortilla de harina | 0.49 | Arroz | 5.34 | Pasta | 60.40 |
| Tortilla de maíz | 0.23 | Huevo | 0.46 | Masa de harina | 4.99 |
| | | | | Arroz | 4.07 |

Figura 44. Desglose del tipo de residuos de cada muestra.

4.2 Análisis de los residuos sólidos orgánicos en laboratorio.

Las muestras analizadas contenían restos de RSO procesados y sin procesar como se muestran en la figura 45.

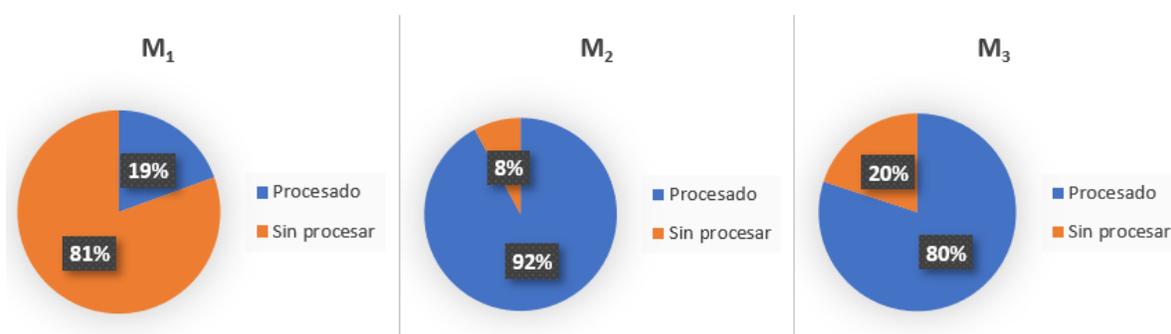


Figura 45. Distribución de los residuos clasificados como Procesados y Sin Procesar de las Muestras M₁, M₂ y M₃.

Los resultados de los parámetros que influyen en el proceso de digestión anaeróbica (densidad, pH, humedad, ST, SV, SF y DQO) de las muestras de residuos M1, M2 Y M3 se enlistan en la figura 46.

| Parámetro | M ₁ | M ₂ | M ₃ |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| pH | 5.60 | 7.60 | 6.80 |
| Densidad (g/L) | 998.07 | 1,010.64 | 1,016.71 |
| % Humedad | 82.64 | 73.07 | 74.42 |
| % Ceniza | 7.52 | 29.28 | 25.91 |
| % Sólidos volátiles | 92.48 | 70.72 | 73.10 |
| Sólidos totales (mg/L) | 173,278.00 | 272,126.00 | 260,092.00 |
| Sólidos volátiles (mg/L) | 160,250.00 | 192,440.00 | 190,114.00 |
| Sólidos fijos (mg/L) | 13,028.00 | 79,686.00 | 69,978.00 |
| Demanda química de oxígeno (mg/L) | 359,000.00 | 712,000.00 | 580,000.00 |

Figura 46. Resultados del análisis de laboratorio a las muestras M₁, M₂ y M₃.

4.3 Dimensionamiento teórico de biodigestor.

Del estudio de caracterización y del análisis de laboratorio de los RSO, se obtuvieron los valores de RSO_d y ρ promedio de las muestras, de tal forma que se obtuvo Q a partir de la ec. 10, los datos se muestran en la figura 47.

| Descripción | Resultado |
|--|------------------------|
| Promedio de generación de RSO diario (kg/día) | 12.81 |
| Densidad promedio M_1, M_2, M_3 (kg/m ³) | 1,008.47 |
| Flujo volumétrico (m ³ /día) | 12.70x10 ⁻³ |

Figura 47. Valores producto de la ecuación 10.

El volumen del reactor resulta de la ec. 9, siendo el producto de Q por TRH, los datos se muestran en la figura 48.

| Descripción | Resultado |
|--|------------------------|
| Flujo volumétrico con relación agua 1:1 (R.Kigozi et al, 2014) (m ³ /día) | 25.40x10 ⁻³ |
| Tiempo de retención hidráulica (Pham Van et al, 2019) (días) | 30 |
| Volumen del reactor (m ³) | 0.762 |

Figura 48. Valores producto de la ecuación 9.

En la figura 49 se muestran los resultados de la CSV, VCO, el V_g y V_t de acuerdo a las ec. 11, 12 y 13 respectivamente.

| Descripción | Resultado |
|---|-----------|
| Concentración de sólidos volátiles (kg/m ³) | 180.94 |
| Velocidad de carga orgánica (kg SV/m ³) | 6.03 |
| Volumen del contenedor de biogás (m ³) | 0.381 |
| Volumen total del biodigestor (m ³) | 1.143 |

Figura 49. Valores producto de las ecuaciones 11, 12 y 13.

4.4 Estimación teórica de la producción de biogás

Con los datos obtenidos en los análisis, se usaron los valores de los porcentajes de SV y RS junto con el valor promedio de potencial de rendimiento de biogás de varios autores de la ec. 14, los resultados son los que se muestran en la figura 50.

| Descripción | Resultado | | |
|--|------------|-----------|-----------|
| | M_1 | M_2 | M_3 |
| Potencial de producción de biogás (m ³ /kg) | 0.06885787 | 0.0816836 | 0.0802021 |

Figura 50. Valores producto de la ecuación 14.

Capítulo 5: Discusión, conclusión y recomendaciones

5.1 Discusión

En este apartado se realiza la discusión de los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, el cual tuvo como objetivo dimensionar un biodigestor que permita usar los residuos sólidos orgánicos desechados por cafetería de CETYS Universidad para producir energía térmica, a partir de la caracterización y análisis de los RSO.

Los detalles, así como los resultados, se muestran conforme a las 4 etapas en las que se dividió la metodología de este proyecto de investigación, donde éstas se encuentran alineadas a los objetivos específicos propuestos en el capítulo 1.

Durante la primera etapa, “Estudio de generación y caracterización de RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad”, la cual buscaba saber el tipo, cantidad y características particulares de los RSO, con el apoyo del personal de cocina de la cafetería quienes dejaron identificadas las bolsas de basura con los desechos de comida producto de la elaboración de alimentos que se venden en el lugar que posteriormente fueron estudiadas. Los resultados obtenidos nos mostraron que la generación promedio de RSO es de 12.82kg por día, siendo residuos orgánicos e inorgánicos en un 97.69% y 2.31% respectivamente.

En relación a la generación per cápita tomando en cuenta una población total 8,329 personas (dato proporcionado por la misma universidad hasta enero 2020 que incluye personal administrativo, técnico, labores generales, docentes y alumnado), resulta ser de 1.54×10^{-3} kg/día/persona. Con respecto a la generación por área, el campus cuenta con una superficie de 51.36 hectáreas lo que significa 2.5×10^{-5} kg/m². Estudios realizados de caracterización de residuos sólidos realizados en diferentes universidades de México, como en Iberoamericana (Ruiz, 2012), UNAM (Alcántara, Cruz, & Santos, 2005) y UABC (Armijo, Ojeda, & Ramirez, 2008), registran datos de residuos per cápita y por m² notablemente mayores, estos se muestran en la figura 51, también incluyen los obtenidos producto de esta investigación.

| Autor | Universidad | kg/persona | kg/m² |
|------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|
| Ruiz, 2012 | IBERO | 0.33000 | 0.01700 |
| Alcántara et al., 2005 | UNAM | 0.11000 | 0.00200 |
| Armijo et al., 2008 | UABC | 0.05000 | 0.00300 |
| | CETYS | 0.00154 | 0.00025 |

Figura 51. Comparativos de resultados de residuos generados per cápita y por m² con otras universidades de México.

Cabe señalar que los estudios realizados en esas diferentes universidades incluyeron residuos de toda el área de la universidad, incluyendo hasta residuos producto de jardinería a diferencia del realizado en esta investigación que sólo incluyo lo que personal de cocina de cafetería desechaba. Con base a lo anterior se cumplió con el primero objetivo específico de esta investigación, pues se lograron obtener datos que no existían con anterioridad ya que no se contaba con estudios previos de caracterización dentro de la Universidad, estos datos fueron importantes y necesarios ya que servirían para la siguiente etapa.

Durante la segunda etapa, “Análisis físico-químico de los RSO” se buscó analizar una serie de muestras de los RSO previamente caracterizados. En base a los resultados de laboratorio, se aprecia que el pH de la M₃ está más cerca de ser neutro a diferencia de las otras dos; M₁ fue la que tuvo un valor más ácido. La finalidad de conocer estos valores es con el propósito saber si el sustrato requiere ser neutralizado antes de emplearse como alimento al biodigestor evitando acidificar la reacción dentro del reactor, provocando paro en la producción de biogás. Adicionalmente, se conoció el valor de %SV de cada una de las muestras, el más alto fue de la M₁ con un 92.48%SV, seguido de M₃ y M₂ con 73.10%SV y 70.20%SV respectivamente; la ventaja de contar con un alto porcentaje en este valor es que teóricamente entre mayor sea el volumen de SV en el residuo, mayor es el potencial de producir el biocombustible, es decir que por cada gramo de ellos degradado se convierte en biogás. La figura 52 muestra una recopilación (Bong, et al., 2018) de los %SV, ST y pH de varios autores que analizaron residuos orgánicos de desechos de cafeterías de universidades, también se muestran los resultados que se obtuvieron producto de esta investigación como comparativa.

| Autor | País | ST | SV | pH |
|-----------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Browne y Murphy, 2013 | Irlanda | 29.40% | 95.30% | 4.10 |
| Jabeen, et al., 2015 | Pakistan | 27.45% | 91.99% | .- |
| Yong et al., 2015 | China | 20.05% | 19.86% | 7.17 |
| Li y Jin, 2015 | China | 18.66% | 93.64% | 6.47 |
| Zhai et al., 2015 | China | 23.19% | 95.69% | 4.20 |
| Chen et al., 2014 | China | 26.90% | 25.20% | 4.51 |
| Wang et al., 2014 | China | 22.17% | 17.87% | 5.08 |
| Sheng et al., 2013 | China | 27.59% | 25.91% | 4.51 |
| Zhang et al., 2013 | China | 18.50% | 17.00% | 5.20 |
| M ₁ | México | 17.36% | 92.48% | 5.60 |
| M ₂ | México | 26.93% | 70.72% | 7.60 |
| M ₃ | México | 25.58% | 73.10% | 6.80 |

Figura 52. Comparativa de resultados de ST, SV u pH de varios autores.

En función de lo anterior, permitió cumplir con el segundo objetivo específico de la investigación, ya que se obtuvo información relevante para estimar la cantidad de producción de biogás en los resultados del laboratorio también necesarios para las siguientes últimas dos fases del proyecto.

La tercera etapa, “Dimensionamiento teórico de biodigestor para RSO generados en la cafetería de CETYS Universidad”, la cual buscaba determinar el volumen un biodigestor en función del residuo y sus características. El volumen del reactor se basa en los datos de Q y TRH, se obtuvo un volumen de 0.762m³. R. Kigozi, et, al, 2014, menciona que mientras la velocidad de carga orgánica se mantenga en el rango de 5-10 kg SV/m³, el volumen del reactor es correcto, el análisis arrojó un valor de 6.03 kg SV/m³. De acuerdo al mismo autor, se determinó el volumen del contenedor de biogás lo que resultó entonces en un volumen total del biodigestor de 1.143m³. Así pues, a partir de lo anterior se cumple con el tercer objetivo específico de proponer un biodigestor que se adapte a las condiciones de los residuos de la cafetería.

Por último, la cuarta etapa, “estimación teórica de producción de biogás”, la cual buscaba estimar qué tanto se puede obtener de biogás con los RSO de cafetería. El valor promedio de potencial de producción de biogás que se obtuvo como se describió en el capítulo 3 de la presente investigación, es de 0.429 m³/kg SV y al obtener los valores de la ec. 19 para cada muestra se obtuvo la cantidad teórica de producción de biogás por cada kg de residuo desechado, cumpliendo así con el cuarto y último objetivo específico.

Al contar con el valor de la generación promedio de RSO diaria se obtuvo entonces la producción estimada de biogás por día, como se muestra en la figura 53.

| Descripción | Resultado | | |
|---|----------------|----------------|----------------|
| | M ₁ | M ₂ | M ₃ |
| Potencial de producción de biogás (m ³ /día) | 0.88 | 1.05 | 1.03 |

Figura 53. Potencial de producción de biogás al día de cada muestra analizada.

Lo anterior señala que el rango de producción estimado para las muestras analizadas se encuentra entre 0.88-1.05 m³ de biogás al día.

Recordando que el objetivo general del presente trabajo era dimensionar un biodigestor que permita usar los residuos orgánicos desechados por la cafetería de CETYS Universidad, así como estimar el potencial que tienen para producir biogás a partir de la caracterización y análisis de los mismos, se puede decir que al obtener tanto los valores teóricos de el volumen del biodigestor como el del potencial de producción de biogás, se cumplió exitosamente con la finalidad de este proyecto de investigación.

En consecuencia, de los logros presentados, la hipótesis planteada en la sección 1.6 del presente documento, “Los residuos sólidos orgánicos que desecha la cafetería de CETYS Universidad, producto de la elaboración de alimentos, tienen el potencial de producir 0.2m³ de biogás por kilogramo”, no es aceptada

CETYS Universidad cuenta con un biodigestor marca HOME BIOGAS, modelo TG1B2; la finalidad de adquirir el equipo fue para realizar pruebas con los residuos de la cafetería de la universidad. La base del valor propuesto en la hipótesis es un dato que el mismo fabricante del equipo sugiere, un rendimiento de 0.2m³ de biogás por cada kg de residuo de comida (Alexander, et al.,2019) y se seleccionó como parámetro para que una vez realizadas las pruebas de laboratorio al residuo se realizara una comparación. El mismo fabricante sugiere que la energía producida con el rendimiento anterior es suficiente para 1hr de cocina (se refiere a tiempo de cocción). Para hacer un contraste entre tipos de combustibles, un ejemplo de lo anterior es, si se considera una estufa (quemador) que trabaja a 5MJ (mega Joules), le tomaría 3.4 minutos elevar 1 litro de agua de 20 °C a 100 °C a nivel del mar al sólo metano, cuando para el mismo quemador requeriría 4.6 minutos obtener el mismo resultado considerando usar biogás con una concentración al 73% de metano; al gas LP le tomaría 4.01 minutos (Alexander, et al.,2019).

Otro comparativo en términos de energía, de acuerdo a la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés) es el que se muestra en la figura 54, donde se refleja que para tener el mismo contenido energético que tendría un kg de gas LP se requerían 2.10 m³ de biogás (IRENA, 2016).

| Cantidad y tipo de combustible | Volumen de biogás con el mismo contenido energético (m ³) |
|--------------------------------|---|
| 1 kg de madera | 0.25 |
| 1 kg de carbón | 0.65 |
| 1 litro de queroseno | 1.60 |
| 1 litro de gas LP | 1.05 |
| 1 kg de gas LP | 2.10 |

Figura 54. Comparativo de contenido energético de diferentes tipos de combustibles. (IRENA, 2016).

El que no haya sido aceptada la hipótesis no supone que el residuo de cafetería no sea funcional para producir biogás sólo que el potencial teórico que tiene el desecho analizado es menor al sugerido por el fabricante. Para aumentar la cantidad de generación del biocombustible, se podría optar por sumar dos opciones:

- Incluir los RSO que generan los comensales de la cafetería, aquellos que se generan en los otros negocios de comida aledaños (dentro de la universidad) así también como los RSO que se encuentran los botes de basura alrededor del campus.
- Incluir los residuos de poda que genera el campus.

Inicialmente, como se pretendían hacer pruebas con el biodigestor adquirido por la universidad, no se incluyeron los residuos de poda ya que en el manual y especificaciones del fabricante prohíbe alimentar al reactor con ese tipo de desperdicios. Si bien, en estudios remotos se ha identificado que el potencial de producción de biogás de residuos como hojas de árboles o zacate se encuentran en un rango de 0.134-0.209 m³ /kg SV (Cho, Park, & Chang, 1995), estudios más recientes han demostrado que la digestión anaeróbica entre restos orgánicos de comida y de poda, bajo diferentes proporciones de mezcla, podrían elevar el potencial de producción de biogás en un rango de 3.4-11.2% (Mu, et al., 2019); los resultados de laboratorio de los residuos que utilizó Kigozi, et al., 2019, mostraron %SV de 94.9% y ST de 27.14%, utilizando prácticamente una relación 1:1 de RSO y restos de jardinería, que si se usara el mismo promedio de

potencial de biogás del capítulo 3 de ésta investigación, teóricamente esa mezcla tendría un potencial de producir 0.11m^3 de biogás por kg de residuo, es decir poco más del 30% comparado con el rendimiento de M_2 . Sin embargo, es una estimación teórica y requeriría de probarse en laboratorio o en campo.

5.2 Conclusión y recomendaciones

El potencial para producir biogás con los RSO de cafetería no fueron los que se esperaban, de acuerdo a la hipótesis formulada. El valor propuesto en la hipótesis (0.2m^3) es un dato del mismo proveedor del equipo y se obtuvo del estudio que hizo Alexander, S et al.,2019, con el sistema TG1B1. Después de todo, con el resultado que se obtuvo producto del análisis de las muestras en el laboratorio, el valor de potencial que tiene el residuo para producir biogás se encuentra entre un 35% y un 40% del valor estimado en la hipótesis. Aun con lo anterior, se tiene la capacidad de alimentar al biodigestor con el máximo diario que establece el fabricante, con la premisa de producir hasta 3 horas de flama (utilizando el quemador especial que viene incluido con el sistema) con capacidad máxima de energía de 4.4kWh (15.4MJ).

Un ejemplo del modelo actual (A) que existe en cafetería es como el que se muestra en la figura 55, dónde la cafetería se abastece de sus proveedores para elaborar y/o vender alimentos, genera residuos y estos al final terminan en los vertederos, todo sigue una misma línea y no existe alguna salida para recuperar o reciclar residuos (ya sean orgánicos o inorgánicos). La misma figura anterior describe una alternativa (modelo B) al usar un biodigestor como fuente de producción de biogás (recuadros en verde), así como el potencial que tienen otros residuos de ser recuperados (que puede ser base para otro estudio de investigación). Si únicamente se tomara en cuenta la cantidad generada de residuos que resultaron de esta investigación y sabiendo que una sola tonelada de residuo orgánico genera 4.2 toneladas de CO_2 (Power Knot, 2012), al hacer uso de un biodigestor se estarían reduciendo las emisiones de carbono en 16.85 toneladas al año (considerando 6 días a la semana que opera la cafetería), existiendo aun un mayor potencial de reducción si se toman en cuenta los residuos que se comentaron al final de la sección 5.1 de éste capítulo. El modelo propuesto es perfectible, la idea principal es coadyuvar a emitir menos gases de efecto invernadero a la atmósfera contribuyendo con el medio ambiente, obteniendo también beneficios sociales (menos GEI contribuyen a un

ambiente más saludable para las personas) y económicos (como la recuperación de biogás y bioabono que pueden utilizarse en la misma universidad aligerando costos actuales).

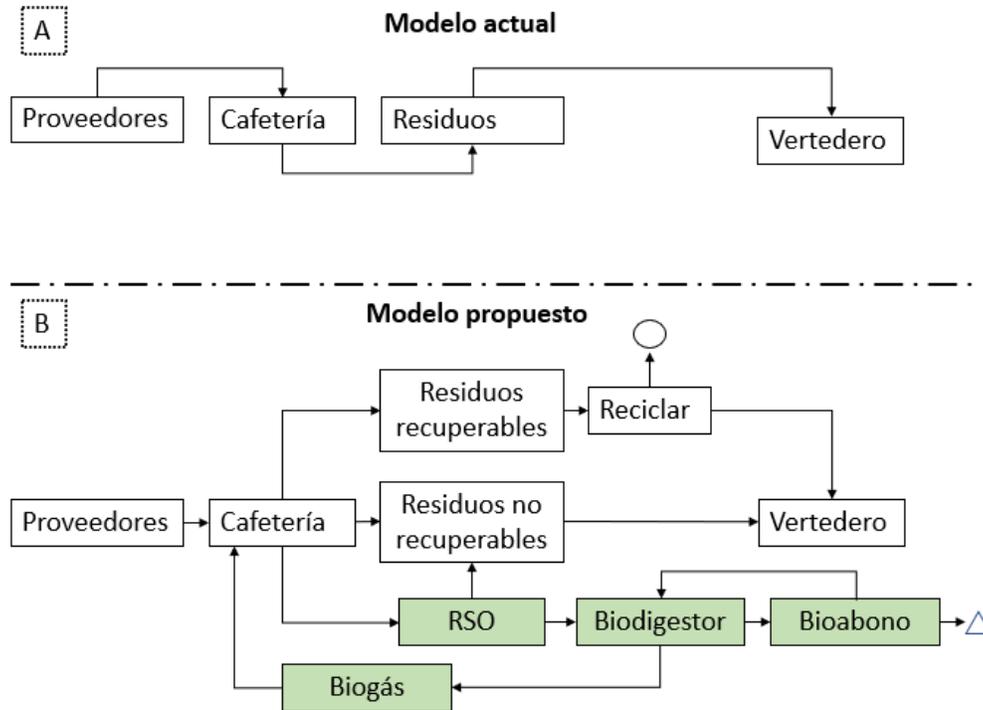


Figura 55. Ejemplo del modelo actual del flujo de productos que usa la cafetería de CETYS y un modelo alternativo.

Es recomendable seguir con la caracterización y análisis de RSO para las estaciones del año que no pudieron ser evaluadas. Si la tendencia de generación del tipo de residuos desechados por los empleados de cocina se comportara de manera similar para las estaciones de primavera y verano, podríamos establecer que el comportamiento de generación de biogás a lo largo del año sería prácticamente semejante a los resultados obtenidos en este estudio. Sin embargo, es necesario realizar un estudio de caracterización bajo la misma modalidad en que éste fue ejecutado durante esas estaciones del año que faltan de investigar para corroborar y comparar los datos.

Las muestras analizadas en el laboratorio fueron seleccionadas de acuerdo a los residuos generados de un día en específico. Sería conveniente analizar una muestra que contenga los valores que representen a los residuos orgánicos generados en general por

cada estación del año, eso generaría una estimación de producción de biogás con porcentaje de confianza mayor.

Finalmente, se requieren realizar pruebas experimentales en el biodigestor y comprobar el potencial real de metano que se puede obtener con distintas mezclas de RSO generados en la cafetería y realizar la comparativa de las especificaciones del proveedor del sistema con las generadas una vez puesto en marcha el reactor. De igual forma con el correcto análisis físico-químico del residuo se determinan los pros y contras para definir las mezclas adecuadas del sustrato a degradarse en el biodigestor para obtener una alta generación de metano.

Referencias

- Adeniran, A. E., Nubi, A. T., & Adelopo, A. O. (2017). Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for sustainable waste management. *Elsevier: Waste Management*, 3-10.
- Aguilar, Q., Armijo, C., & Taboada, P. (2010). Potencial de recuperación de residuos sólidos. *Revista de ingeniería*, 17-27.
- Alcántara, V., Cruz, I., & Santos, E. (2005). Caracterización y cuantificación de los residuos sólidos en ciudad universitaria. *Congreso Interamericano de Residuos* (págs. 1-88). Mérida: Memorias congreso.
- Alexander, S., Harris, P., & McCabe, B. (2019). Biogas in the suburbs: An untapped source of clean energy? *Journal of Cleaner Production*, 1025-1035.
- Ananthakrishnan, R., Sudhakar, K., Goyal, A., & Sravan, S. (2013). Economic Feasibility Of Substituting LPG With Biogas For MANIT Hostels. *International Conference on Global Scenario in Environment and Energy*, 891-893.
- Arango, J. F. (28 de Abril de 2018). *Congreso de Baja California*. Obtenido de Congreso BC: http://www.congresobc.gob.mx/Parlamentarias/Documento/INILEY_ARANGO_26ABRIL2018.pdf
- Armijo, C., Ojeda, S., & Ramirez, M. (2008). Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste Management*, 21-26.
- Bong, C., Lim, L., Lee, C., Klemes, J., Ho, C., & Ho, W. (2018). The characterization and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion - a review. *Journal of Cleaner Production*, 1545-1558.
- Browne, J. D., & Murphy, J. D. (2014). Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Elsevier: Applied Energy*, 170-177.
- Char, J. (2001). *El biogas*. Colombia.: ICA Instituto Colombiano Agropecuario.
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H. P., Huba, E. M., Gao, R., & Wang, X. (2014). *Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Chien Bong, C. P., Yee Lim, L., Tin Lee, C., Jaromir Klemes, J., Siong Ho, C., & Shin Ho, W. (2018). The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion - A review. *Elsevier: Journal of Cleaner Production*, 1545-1558.
- Cho, J., Park, S., & Chang, H. (1995). Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. *Bioresource Technology*, 245-253.
- CONAGUA. (2016). *Lineamientos técnicos: Sistema de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda en zona rural*. Mexico: CONAGUA.
- Contreras, L. (2006). *Producción de biogás con fines estratégicos. De lo histórico a lo estratégico*.

- Curry, N., & Pillay, P. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Elsevier: Renewable Energy* 41, 200-209.
- Espinoza, R. M., Turpin, S., Polanco, G., de la Torre, A., Delfín, I., & Raygoza, I. (2008). Integral urban solid waste management program in a Mexican university. *Waste Management*, 27-32.
- Faith, M., & Rivas, O. (2012). Obtención de un mejorador de suelos como subproducto de la digestión anaerobia de desechos orgánicos en el TEC. *Tecnología en marcha*, vol 25, no. 3, 21-27.
- FAO. (2018). Obtenido de <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/>
- FAO. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires, Argentina.
- García, H. L., De Menna, F., & Vittuari, M. (2019). Food waste at school. The environmental and cost impact of a canteen meal. *Waste management - Elsevier*, 249-258.
- García, K. (26 de Junio de 2018). Precio del gas LP continua en aumento. *El Economista*. Obtenido de El Economista: <https://www.economista.com.mx/empresas/Costo-del-gas-LP-persiste-al-alzarse-a-baja-de-precio-en-Estados-Unidos-20180626-0040.html>
- Global Methane*. (2016). Obtenido de Global Methane: https://www.globalmethane.org/documents/AD-Training-Presentation_Oct2016.pdf
- Google. (2020). *Ubicación de la cafetería de Cety's Universidad*. Obtenido de <https://www.google.com.mx/maps/@32.6550837,-115.4098789,102m/data=!3m1!1e3>
- Gunther, M. (17 de October de 2014). *Guardian*. Obtenido de Guardian: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2014/oct/17/disney-world-biogas-food-waste-energy-clean-tech>
- Heras, A. (2 de Junio de 2018). Cada bajacaliforniano genera casi un kilo de basura al día. *La jornada de Baja California*. Obtenido de La jornada de BC: <http://jornadabc.mx/tijuana/02-06-2016/cada-bajacaliforniano-genera-casi-un-kilo-de-basura-al-dia>
- INEGI. (7 de November de 2018). *INEGI*. Obtenido de INEGI: http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018_presentacion_resultados.pdf
- IRENA. (2016). *Measuring small-scale biogas capacity and production*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA).
- Jabeen, M., Yousaf, M., & Malik, R. (2015). High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. *Elsevier: International Biodeterioration & Biodegradation*, 1-5.
- Kigozi, R., Aboyade, A., & Muzenda, E. (2014). Sizing of an Anaerobic Biodigester for the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol II*, 1-5.

- Kofalusi, G. K., & Aguilar, G. E. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta ecológica 79, Instituto de Ecología, México*, 39-51.
- Kunwar, P., Sandeep, K., Monika, Y., Nidhi, P., Aakash, C., & Vivekanand, V. (2017). Food waste to energy: An overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. *BioMed Research International*, 19.
- Linnenberg, C. (2015). Biodigestión de residuos sólidos urbanos y aguas residuales municipales. *Foro Internacional 2015 Valorización Energética de Residuos Urbanos*. Mexico.
- Matsakas, L., Kekos, D., Loizidou, M., & Christakopoulos, P. (2014). Utilization of household food waste for the production of ethanol at high dry material content. *Biotechnology for Biofuels volume 7*, 4-12.
- Mohan, S., & Jagadeesan, K. (2013). Production of Biogas by Using Food Waste. *International Journal of Engineering Research and Applications* , 390-394.
- Moncayo, G. (2008). *Biodigestores: Dimensionamiento diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*.
- Mosisa, F. T., & Shunki, G. (2018). Design and Implementation of Biogas System from Dining Hall Waste of Students Cafeteria at Jimma Institute of Technology, Ethiopia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 20-24.
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., & Li., A. (2019). Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production. *Science of The Total Environment*, 1-48.
- Pham Van, D., Fujiwara, T., Leu Tho, B., Son Toan, P., & Hoang Minh, G. (2019). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating, parameters and current trends. *Environmental Engineering Research*, 1-17.
- Pinochet, P. (3 de septiembre de 2015). *Tecnologías Chile*. Obtenido de Plataforma Tecnológica: <https://tecnologiaschile.com/2013/09/03/diferencia-entre-incineracion-gasificacion-y-pirolisis/#:~:text=En%20la%20incineraci%C3%B3n%20el%20proceso,a%20la%20atm%C3%B3sfera%20de%20CO2>.
- Red Mexicana de Bioenergía*. (2018). Obtenido de <http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biogas/>
- Riquelme, J. (2011). *Problemas de estimación/observación en procesos de biodigestión anaeróbica*. (tesis de licenciatura).
- Romo, C. A., Medrano, C., Romero, H., Arvizu, J. L., Huacuz, J., & Beltrán, J. (Octubre de 2012). *Guía de usuario: Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*. Cuernavaca, Morelos.: Insituto de Investigaciones Eléctricas. Obtenido de INEEL: <https://www.ineel.mx/docu/Guia-RSU.pdf>
- Ruiz, M. (2012). Caracterización de residuos sólidos en la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.

- Sigler, E. (7 de Marzo de 2018). ¿Cuánto ha subido el gas LP? Depende de tu estado. *Expansión*.
Obtenido de Expansión: <https://expansion.mx/empresas/2018/03/06/cuanto-ha-subido-el-gas-lp-depende-de-tu-estado>
- Solís, A. (15 de Marzo de 2018). El precio del gas LP aumentó 14% durante febrero. *Forbes México*.
Obtenido de Forbes México: <https://www.forbes.com.mx/el-precio-del-gas-lp-aumento-14-durante-febrero/>
- Tampio, E., Ervasti, S., Paavola, T., Heaven, S., Banks, C., & Rintala, J. (2014). Anaerobi digestion of autclaved and untreated food waste. *Elsevier: Waste Management*, 370-377.
- Thuy Pham, T., Kaushik, R., Parshetti, G., Mahmood, R., & Balasubramanian, R. (2014). Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *ELSEVIER*, 399-408.
- Thyberg, K. L., & Tonjes, D. J. (2016). Drivers of food waste and their implications for sustainable policy development. *Elsevier*, 110-123.
- Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile.
- Vásquez, N. C., & Riveros, D. R. (2013). *Diseño y construcción de un prototipo biodigestor tipo mixto para la producción y almacenamiento de gas metano (Tesis de pregrado)*. Bogotá: Universidad de Sanbuenaventura.
- Ventura, J.-R. S., Lee, J., & Jahng, D. (2014). A comparative study on the alternating mesophilic and thermophilic two-stage anaerobic digestion of food waste. *Journal of Enviromental Sciences*, 1274-1283.
- Wilkie, A. C., Graunke, R. E., & Cornejo, C. (2015). Food Waste Auditing at Three Florida Schools. *Sustainability*, 1370-1387.
- Yang, Y., Bao, W., & Xie, G. (2018). Estimate of restaurant food waste and its biogas production potential in China. *Journal of Cleaner Production*, 1-27.
- Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Elsevier: Renewable Energy*, 527-530.
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *El Sevier*, 929-935.