



UNIVERSIDAD FEDERAL DE OURO PRETO
ESCUELA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL



LEIDY KATHERINE CASTRO LÓPEZ

EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS
ALIMENTICIOS, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA

TRABAJO DE GRADUACIÓN DE INGENIERIA AMBIENTAL

Ouro Preto, 2019

LEIDY KATHERINE CASTRO LÓPEZ

EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS
ALIMENTICIOS, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA

Monografía presentada al curso de Ingeniería Ambiental de la Universidad Federal de Ouro Preto, como parte de los requisitos para la obtención del título de Ingeniera Ambiental.

Orientador: Bruno Eduardo Lobo Baêta

Héctor Javier Luna Wandurraga

Ouro Preto, 2019

L864e López, Leidy Katherine Castro .
Evaluación del pretratamiento térmico de residuos alimenticios, para la
producción de biogás mediante digestión anaerobia [manuscrito] / Leidy
Katherine Castro López. - 2019.

50f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Eduardo Lobo Baêta.
Coorientador: Prof. Dr. Héctor Javier Luna Wandurraga .

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Ambiental.

1. Reaproveitamento-sobras. 2. Biogás. 3. Digestão anaeróbica. I. Baêta,
Bruno Eduardo Lobo . II. Wandurraga , Héctor Javier Luna . III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 502/504

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

Marco constitucional

El presente trabajo de graduación fue desarrollado dentro del marco de cooperación institucional entre la Universidad Antonio Nariño y la Universidade Federal de Ouro Preto, el cual busca promover la transferencia de conocimiento y tecnología entre los dos países, el trabajo EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ALIMENTICIOS, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA fue orientado por el profesor de la Universidad Antonio Nariño (UAN) Héctor Javier Luna Wandurraga y por el profesor de la Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) Bruno Eduardo Lobo Baêta.

Bruno Eduardo Lobo Baêta

BRUNO BAÊTA

Director Trabajo de Grado (UFOP)



Hector J Luna W

HÉCTOR LUNA

Director Trabajo de Grado (UAN)



Hoja de aprobación

Certifico que la alumna Leidy Katherine Castro López, autora del trabajo de conclusión de curso titulado EVALUACIÓN DEL PRETRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS ALIMENTICIOS, PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA, realizó las correcciones sugeridas por la banca examinadora y que estoy de acuerdo con la versión final del trabajo.

Bruno Eduardo Lobo Baêta

Dr. Bruno Eduardo Lobo Baêta

Orientador (UFOP)

Hector J Luna W

Dr. Héctor Javier Luna

Orientador (UAN)

Ouro Preto, 21 de enero de 2020

AGRADECIMIENTOS

Dios y ciencia, me han llevado por el camino que siempre deseé, aunque para muchos es contradictorio, han sido mi complemento perfecto para día a día enamorarme de mi profesión y de lo que sueño.

Agradezco a Dios por mi vida, por la vida de los que más amo, por darme el tesoro y bendición más grande que son mis padres y hermanos. Hoy quiero dedicar este título a ellos, que día a día se esforzaron por verme triunfar. Además de ser el motor de mi vida, son mi apoyo, compañía, consuelo, esperanza y sé que por su gran ejemplo de vida e inculcarme sus valores, me siento demasiado segura de la mujer que soy. En especial a mi hermanita Caro, que es mi mayor orgullo y ha sido testigo de estos años de esfuerzo y dedicación.

También, dedico este gran logro al ángel de mi cielo quien siempre quiso verme siendo una gran profesional, me impulso a ser una mujer soñadora y me condujo a reconocer el valor de las pequeñas cosas. Aunque no esté aquí en la tierra, en mi corazón estará por toda la eternidad.

Quiero dar un agradecimiento especial, a mi tutor Héctor Javier Luna Wandurraga por ayudarme en mi crecimiento profesional, personal y por su apoyo incondicional. Gracias por guiarme a la mejor experiencia, que marcó un antes y un después en mi vida. A mis profesores de la Universidad Antonio Nariño que, gracias a su arte de enseñar yo aprendí a colorear de la mejor manera. Al profesor Bruno Eduardo Lobo Baêta, por el acompañamiento y guía durante mi estadía en Brasil; y por permite ser parte de este proyecto, con el que hoy culmino mis estudios universitarios.

A Yasmim Arantes Da Fonseca, quien es una excelente profesional, por haber sido la persona más paciente y amable, por su guía y apoyo; por haberme brindado una mano amiga y conducir mi proyecto de grado por el mejor camino, gracias a su ayuda y a la de mi compañero y amigo Gustavo este trabajo ha sido posible.

A mis amigos de la Universidad Antonio Nariño y la Universidade de Ouro Preto, quienes me acompañaron y dieron palabras de aliento para nunca desfallecer. A todas las personas que conocí en Ouro Preto, por ayudarme a ser mejor persona.

RESUMEN

El aumento constante de la población, exige un aumento en la demanda de alimentos. En respuesta a dicho consumo, se genera gran cantidad de residuos y desperdicios, además de los impactos causados en los recursos naturales usados para producirlos. Paralelamente, el uso de fuentes energéticas no renovables, genera la búsqueda de alternativas de fuentes renovables, que puedan emplear los residuos o desechos provenientes de otros productos. Como contribución a los objetivos de desarrollo sostenible, entre ellos el uso de energías renovables y no contaminantes; en la ciudad de Ouro Preto, Minas Gerais-Brasil, la alta generación de residuos alimenticios en el restaurante universitario de la Universidad Federal de Ouro Preto, exige el tratamiento de los mismos, aunque actualmente son llevados para el consumo de animales, este estudio tiene como objetivo evaluar el uso de los residuos alimenticios en la producción de biogás, con visas al aprovechamiento energético del propio establecimiento.

Los residuos alimenticios se caracterizaron fisicoquímicamente antes y después de aplicar un pretratamiento hidrotérmico a temperaturas de 125 °C, 160 °C y 180 °C, que tuvo como finalidad solubilizar la materia orgánica contenida en el sustrato para una mayor eficiencia de producción de biogás, además que agilizó la etapa de hidrólisis de la DA. El sustrato en bruto poseía ST= 19,3%, SV=18,3%, C/N=30, lípidos= 25,4%, carbohidratos=22,8% y proteínas=10,7%. Luego que se sometió a pretratamiento el sustrato, dichas características fueron alteradas con el aumento de la temperatura como la DQO, la relación C/N y la aparición de concentraciones significativas de NH_4^+ . Sin embargo, la alta concentración de lípidos y proteínas, generó inhibición de los metanogénicos por la acumulación de ácidos grasos que causaron acidificación en el medio, consiguiéndose apenas valores de 1,97 NmL CH_4 /g de SSV a temperatura 125°C y A/M= 0,5. Así, la acumulación de ácidos grasos, permitió a los microorganismos tener gran cantidad de alimento para producir productos intermedios como ácido acético y propiónico, que en su transformación generan H_2 , obteniéndose valores para el sustrato en bruto de 11,59 NmL H_2 /g de SSV y para el sustrato pretratado de 5,82 NmL H_2 /g de SSV a 125°C, 4,21 NmL H_2 /g de SSV a 160°C y 60 NmL H_2 /g de SSV a 180 °C, todos los valores se obtuvieron con la relación A/M= 3. Por lo anterior, se concluyó que, aunque los residuos alimenticios no fueron positivos para la biometanización, fueron un excelente sustrato acidificante para la producción de hidrógeno y ácidos grasos volátiles, que pueden ser productos de alto valor agregado en la industria verde.

Palabras clave: residuos alimenticios, pretratamiento hidrotérmico, acidificación.

ABSTRACT

The constant increase in population requires an increase in the demand for food. In response to such consumption, a large amount of waste and waste is generated, in addition to the impacts caused on the natural resources used to produce them. At the same time, the use of non-renewable energy sources generates the search for alternatives of renewable sources, which can use waste or scrap from other products. As a contribution to the objectives of sustainable development, including the use of renewable and non-polluting energies; in the city of Ouro Preto, Minas Gerais-Brazil, the high generation of food waste in the university restaurant of the Federal University of Ouro Preto, demands the treatment of these, although they are currently taken for the consumption of animals, this study has the objective is to evaluate the use of food waste in the production of biogas, with visas for the energy use of the establishment itself.

The food wastes were characterized physicochemically before and after applying a hydrothermal pretreatment at temperatures of 125 ° C, 160 ° C and 180 ° C, which was intended to solubilize the organic matter contained in the substrate for greater biogas production efficiency, in addition, it accelerated the hydrolysis stage of DA. He raw substrate had TS = 19.3%, VSS = 18.3%, C / N = 30, lipids = 25.4%, carbohydrates = 22.8% and proteins = 10.7%. After the substrate was pretreated, these characteristics were altered with the increase in temperature such as COD, the C / N ratio and the appearance of significant concentrations of NH_4^+ . However, the high concentration of lipids and proteins, generated inhibition of methanogens by the accumulation of fatty acids that caused acidification in the environment, achieving only values of 1.97 NmL CH_4 / g of VSS at temperature 125 ° C and A / M = 0.5. Thus, the accumulation of fatty acids allowed microorganisms to have a large amount of food to produce intermediate products such as acetic and propionic acid, which in their transformation generate H_2 obtaining values for the raw substrate of 11,59 NmL H_2 /g de VSS and for the pretreated substrate of 5,82 NmL H_2 /g de VSS a 125°C, 4,21 NmL H_2 /g de VSS a 160°C y 60 NmL H_2 /g de VSS a 180 °C, all values were obtained with the ratio A / M = 3. Therefore, it was concluded that although food residues were not positive for biomethanization, they were an excellent acidifying substrate for the production of hydrogen and volatile fatty acids, which can be products of high added value in the green industry.

Keywords: Food waste, hydrothermal pretreatment, acidification.

LISTA DE ABREVIATURAS

AGV: Ácidos Grasos Volátiles

COT: Carbono orgánico total

DA: Digestión anaerobia

DQO: Demanda Química de Oxígeno

FAO: Organización de las naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura

ODS: Objetivos de desarrollo sostenible

ONU: Organización Mundial de las Naciones Unidas

PBM: Producción Bioquímica de Metano

RLS: Relación Líquido Sólido

ST: Sólidos totales

STV: Sólidos Totales Volátiles

A/M: relación alimento/microorganismos

LISTA FIGURAS

Figura 1. Etapas del proceso de digestión anaerobia y los microorganismos envueltos en ella. Fuente: adaptado de De Lemos, Chernicharo. (2007)	20
Figura 2. Flujograma de las etapas metodológicas.....	22
Figura 3. Clasificación de los residuos dentro del restaurante universitario	23
Figura 4. Producción porcentual de residuos durante el monitoreo	33
Figura 5. Granulometría de la muestra antes y después de ser sometida a trituración.....	34
Figura 6. Variación de la concentración de AGVs, respecto a la relación A/M	43
Figura 7. Producción de hidrogeno a 125°C y relación A/M=3.....	45
Figura 8. Producción de hidrogeno a 160°C y relación A/M=3.....	46
Figura 9. Producción de hidrogeno 180°C y relación A/M=3	46
Figura 10. Producción de biogás a partir de la biomasa sin lípidos	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de la muestra en bruto	35
Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de la literatura consultada	35
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la fracción sólida, resultante del pretratamiento	38
Tabla 4. Caracterización de la fracción líquida (hidrolizado), resultante del pretratamiento	38
Tabla 5. Concentración de los elementos presentes en la fracción líquida	40
Tabla 6. Caracterización del inóculo	41
Tabla 7. Producción de N mLCH ₄ /g DQO	41
Tabla 8. Relación Ácido butirico -Ácido propiónico/Ácido acético	44

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. REVISIÓN DE LITERATURA	16
3.1 Economía circular en el contexto actual	16
3.2 Biorrefinerías	16
3.3 Residuos alimenticios	17
3.4 Tratamiento hidrotérmico	18
3.5 Digestión anaerobia	19
4. MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1 Monitoreo de la generación de residuos	22
4.2 Recolección de la muestra	23
4.3 Caracterización física y química	23
4.3.1 Granulometría de la muestra	23
4.3.2 Porcentaje de humedad	24
4.3.3 Determinación de sólidos totales, volátiles y fijos	24
4.3.4 Carbono orgánico total	25
4.3.5 Determinación de Demanda Química de Oxígeno:	25
4.3.6 Lípidos	27
4.3.7 Extractivos	28
4.3.8 Contenido de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	28
4.3.9 Determinación de iones	30
4.4 Pretratamiento térmico de la muestra de residuos	30
4.5 Ensayos del Potencial Bioquímico de Metano	31
4.5.1 Determinación del contenido de celulosa y hemicelulosa	32

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1 Monitoreo de la generación de residuos	33
5.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra en Bruto	34
5.2.1 Análisis granulométrico.....	34
5.2.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra en bruto.....	35
5.3 Influencia del pretratamiento térmico en los residuos alimentarios	38
5.4 Efectos del pretratamiento térmico y la relación alimento: microorganismo en la producción de biogás	40
6. CONCLUSIONES	48
7. RECOMENDACIONES	49
8. REFERENCIAS	50

1. INTRODUCCIÓN

La pérdida y desperdicio de alimentos, se ha convertido en uno de los factores más alarmantes para el mundo, pues además de causar presiones morales en la sociedad, también genera deterioro de los recursos naturales utilizados para producir los mismos. (FAO, 2019) Los países desarrollados y en desarrollo, están adoptando medidas que minimicen los diferentes impactos, con el propósito de contribuir al cumplimiento de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), impuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Según un estudio realizado por la FAO (2019), cerca del 14% de los alimentos se pierde desde la etapa posterior a la cosecha hasta la distribución. En América Latina y el Caribe el porcentaje es cerca del 12% para la pérdida de alimentos. Sin embargo, del desperdicio de alimentos se sabe que también es alto en todos los tipos de alimentos como de origen animal y vegetal.

Actualmente las biorrefinerías, se constituyen como el punto de equilibrio para el nexo entre alimentos, energía y agua, en especial las biorrefinerías de segunda generación, que dan uso a materias primas alternativas como única fuente de carbono y materiales renovables, convirtiendo así los problemas nexús en bienestar social y desarrollo sostenible. (MARTINEZ; SAMSATLI, 2017) Los residuos alimenticios, pueden ser una fuente de materia prima renovable y de la cual puede hacerse uso, evitando incrustar más carbono a la atmosfera, durante su proceso de descomposición. (PRAMANIK; SUJA; ZAIN, & PRAMANIK, 2019).

El proceso de transformación de estas materias primas, puede ocurrir mediante la digestión anaerobia, que es un proceso biológico, que descompone la materia orgánica compleja en componentes químicos más simples en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, un gas que se compone principalmente de CH_4 y CO_2 , también conocido como biogás, se produce como productos finales en condiciones ideales. (PRAMANIK; SUJA; ZAIN, & PRAMANIK, 2019)

En la universidad de Ouro Preto, mediante la Resolución CUNI N° 1610 de 2014 tiene en funcionamiento sus restaurantes universitarios, los cuales son Restaurante del Campus Morro do Cruzeiro (RECAM), restaurante del campus Centro Histórico (REMOP) y restaurante del Campus de Mariana (REMAR) y restaurante Jão Monlevade (ICEA). En la Ciudad de Ouro Preto, Minas Gerais – Brasil, se encuentran ubicados dos de ellos, el REMOP y el RECAM, que es el objeto de estudio.

En el Restaurante Campus Morro do Cruzeiro (RECAM), se genera diariamente entre los 94-550 kg de residuos alimenticios, que según las directivas del establecimiento, diferentes variables como cantidad de usuarios, menú del día y mismo así la variabilidad climática, se deben tener en cuenta en la cantidad de alimentos preparados, para evitar sobras.

Actualmente los residuos que se generan en el RECAM, son llevados por personal a cargo del cuidado de animales de granja como lo son cerdos y caballos, que se alimentan de dichos residuos, de lo cual no se tiene ninguna rentabilidad, aunque sea una forma de tratamiento de los residuos. Por consiguiente, lo que se pretende en este estudio, es evaluar la aplicación del pretratamiento térmico a los residuos alimenticios, para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia, con visas al aprovechamiento energético, para suplir la demanda de gas u/o energía eléctrica del mismo establecimiento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar la influencia del pretratamiento hidrotérmico en los residuos alimenticios para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente, los residuos alimenticios provenientes del restaurante universitario.
- Evaluar la producción de biogás de la biomasa bruta y pre-tratada, a alta, media y baja severidad.
- Evaluar el efecto de la relación alimento microorganismo en la producción de biogás para la biomasa bruta y pre-tratada.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Economía circular en el contexto actual

El deterioro de los recursos naturales, eventualmente deja de lado el concepto de medio ambiente sostenible. Pues dichas condiciones, resultan poco favorables para el cumplimiento de los ODS, debido a la alteración de la composición atmosférica, la emisión de gases efecto invernadero y el uso de combustibles fósiles, que generan agotamiento en el medio ambiente. (FAO, 2019) Más aún, la seguridad alimentaria en todo el mundo, implica el uso y agotamiento de los mismos recursos. En Europa, el sector de la base biológica es uno de los mayores productores y consumidores de los recursos naturales, por tanto, se ha convertido en un sector vocal para una economía circular. (LEIPOLD & PETIT-BOIX, 2018)

La economía circular, nace con el objetivo de integrar la seguridad alimentaria, la gestión sostenible de los recursos naturales, la reducción de la dependencia de recursos no renovables y la mitigación y adaptación al cambio climático. (WOŹNIAK & TWARDOWSKI, 2018) En la búsqueda de un concepto más específico, la Comisión Europea define la bioeconomía o economía circular, como “aquella que abarca la producción de recursos biológicos renovables y la conversión de estos y flujos de residuos en productos de valor agregado como alimentos, piensos, productos biológicos, productos y bioenergía. (WOŹNIAK & TWARDOWSKI, 2018)

3.2 Biorrefinerías

El mayor desafío para este siglo, está en transformar una sociedad altamente industrializada en una bioeconomía. (DIECKMANN et al., 2018) Las biorrefinerías, se constituyen como una alternativa para la generación de productos de valor agregado a partir de la conversión sostenible de biomasa. Estas se pueden clasificar de acuerdo al tipo de materia prima (biorrefinerías de algas, de desechos orgánicos, lignocelulósicas) de acuerdo a la tecnología de plataforma (bioquímica o termoquímica) y por el grado de complejidad (Tipo I: materia prima y producto único, Tipo II: materia única, producto múltiple y Tipo III: materia prima múltiple y producto múltiple). (MARTINEZ-HERNANDEZ & SAMSATLI, 2017)

Según Andersen et al., (2018) entre otras características, las biorrefinerías convierten las materias primas en una amplia gama de productos orientados al mercado, además de que las materias primas biogénicas deben usarse por completo, no se producen o se producen

muy pocas corrientes de desecho y una de las más importante es que la carga ambiental (por ejemplo: emisiones en el aire, agua, desperdicio y ruido) debe ser lo más baja posible. En su estudio Guo et al., (2019) menciona que las biorrefinerías pueden transferir hasta el 75% del carbono inicial total en el desperdicio de alimentos a bioproductos. De acuerdo con Rao, Baral, Dey, & Mutnuri, (2010) las biomasas pueden ser convertidas en varias formas de bioenergía, como por ejemplo: etanol, butanol, hidrogeno, biodiesel, electricidad y metano.

En Alemania, un concepto versátil ya ampliamente utilizado de biorrefinería, es la fermentación anaerobia de biomasa en plantas de biogás ubicadas en el campo y con moderada capacidad de conversión. Esta opción de conversión puede actuar como sumidero para degradar básicamente cualquier tipo de material de desecho orgánico (excepto material lignocelulósico sin tratar) en un biogás rico en energía ampliamente utilizable. (ANDERSEN ET AL., 2018)

3.3 Residuos alimenticios

En general, se puede utilizar cualquier materia prima de origen bilógico, pero como la finalidad de los ODS es el desarrollo sostenible, se prefieren biomasas no alimentares, es decir desechos o subproductos de cultivos energéticos. (ANDERSEN ET AL., 2018) El uso de residuos alimentarios, es un temprano estudio que viabiliza una fuente potencial para producir materiales de valor agregado, reemplazando el uso de materiales vírgenes. (CRISTÓBAL, CALDEIRA, CORRADO, & SALA, 2018)

Durante la etapa de consumo, los residuos alimentarios (FW) por sus siglas en inglés, se generan en un 56% y en la etapa de fabricación de alimentos alrededor del 38%. Estos en algunos casos se desvían a los vertederos o en el mejor de los casos se usa como o para producir alimento para animales. (CRISTÓBAL ET AL., 2018). Además de las pérdidas económicas directas que se traducen en aproximadamente US\$ 750 mil millones anuales.

China es uno de los países con mayor generación de residuos alimentarios, aproximadamente 130 millones de toneladas de FW son generadas anualmente, pero es uno de los primeros países en hacer uso de los mismos para la producción de biogás, que tiene como fin el abastecimiento eléctrico.(GUO ET AL., 2019) Sin embargo, en países de América Latina, según un estudio realizado por el Centro de Estudios e Debates Estratégicos e da Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, (2018) en Brasil cerca del 10% de los alimentos producidos son perdidos o desperdiciados.

En Brasil, dicha biomasa remanente de la cadena alimentaria, es aprovechada como compostaje, usada para la alimentación animal, además de ser insumo para otros productos. Y lo que actualmente llama la atención, es la generación de energía a partir del uso de algunos residuos, pudiendo contribuir como fuente renovable para la matriz energética brasileña. (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2012)

Entre las características de interés de los residuos alimentarios generados en el REMOP, de acuerdo con la dieta de alimentación establecida por el grupo NUTRIR. S.A, que incluye vegetales, frutas, carnes y legumbres; es que éstos se componen principalmente de carbohidratos, proteínas, y lípidos. Los desechos de vegetales y frutas, poseen relativamente alto contenido celulósico, mientras que los desechos de alimentos de cocina poseen alto contenido de lípidos, debido a la grasa animal y aceite vegetal.(BONG et al., 2018) Así, diversos estudios a la fecha, muestran el aprovechamiento de la energía contenida en los residuos alimentarios, para la producción de biogás.

Por ejemplo, Pramanik, S., Suja, Zain, & Pramanik, B., (2019) en su estudio sobre el proceso de digestión anaerobia, a partir de residuos alimentares para la producción de biogás, evalúa las características de los residuos, evidenciando que éstos al poseer material altamente biodegradable como los carbohidratos y las proteínas, pueden producir altos rendimientos de metano.

3.4 Tratamiento hidrotérmico

El pretratamiento hidrotérmico o autohidrólisis, es un proceso ecológico basado en colocar una mezcla de agua y biomasa a altas temperaturas, con el objetivo de extraer selectivamente la hemicelulosa. Al ser un proceso autocatalizado, no requiere de adicionar compuestos químicos que actúen como agentes catalizadores en la descomposición de polisacáridos. Aquí los iones hidronio, que provienen de la autoionización del agua y la ionización del ácido acético actúan como catalizadores, éstos se producen a partir de la liberación de grupos acetilo durante la despolimerización de las hemicelulosas. (SANTOS et al., 2018)

Las condiciones adecuadas para el proceso, se seleccionan de acuerdo a la formación mínima de compuestos inhibidores, bajo consumo de agua y energía. Este proceso, es prometedor para el aumento de la biodisponibilidad y biodegradabilidad de la celulosa, al permitir la descomposición de componentes estructurales por la acción de calentamiento y

conducir a la solubilización de compuestos orgánicos por la explosión a vapor. (BAËTA et al., 2017)

Los pretratamientos térmicos, aumentan el área superficial de los sustratos, aumentando el nivel de contacto entre el sustrato y la comunidad microbiana, dando como resultado una biometanización mejorada (SRISOWMEYA, CHAKRAVARTHY, & NANDHINI DEVI, 2019). Sin embargo, un factor importante para el tratamiento de residuos alimentarios, es la temperatura y el tiempo de tratamiento, ya que de acuerdo con (Srisowmeya et al., 2019) temperaturas mayores a 120°C y tiempos de tratamiento mayores a 4 horas, generan impactos negativos como la generación de compuestos tóxicos como Furfuraldehídos y concentraciones elevadas de amonio e inclusive la generación de compuestos aún más difíciles de degradar como las melanoidinas, que son producto de las reacciones Maillard.

Yin et al., (2014), en su estudio sobre la mejora de la producción de ácidos grasos, a partir de la fermentación de residuos alimentares por el tratamiento hidrotermal, obtiene que con la temperatura de 180°C, logra disolver 42,5% más de la demanda química de oxígeno soluble que el control. Además, analizan que la solubilización de carbohidratos y proteínas, se incrementa con un tratamiento hidrotermal entre 100-200°C.

Bong et al., (2018), en su estudio sobre la caracterización y tratamiento de residuos alimentarios para la producción de biogás por digestión anaerobia, analizan la influencia del pretratamiento hidrotermal en las características de los residuos, obteniendo que éste genera un mayor rendimiento de biogás a condiciones adecuadas de tiempo y temperatura, además de tener en cuenta el tipo de sustrato. Los valores de producción de biogás, aplicando el pretratamiento oscilan entre 270-640 mL CH₄/kgSV.

3.5 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia, es un proceso biológico que tiene por objeto transformar la materia orgánica compleja en compuestos químicos más simples. Durante este proceso, un gas compuesto de principalmente de CO₂ y CH₄, se produce como producto final en condiciones ideales. En menor cantidad, también se compone de H₂S, NH₃ y trazas de otros gases. (PRAMANIK, SUJA, ZAIN, & PRAMANIK, 2019)

Este proceso, se compone de cuatro etapas fundamentales que son: la hidrólisis, acidogénesis, acetanogénesis y metanogénesis. Cada una de estas, tiene características especiales que permiten a los microorganismos (principales autores del proceso), la

degradación o transformación de la materia orgánica. La figura 1. muestra cada una de las etapas del proceso de DA.

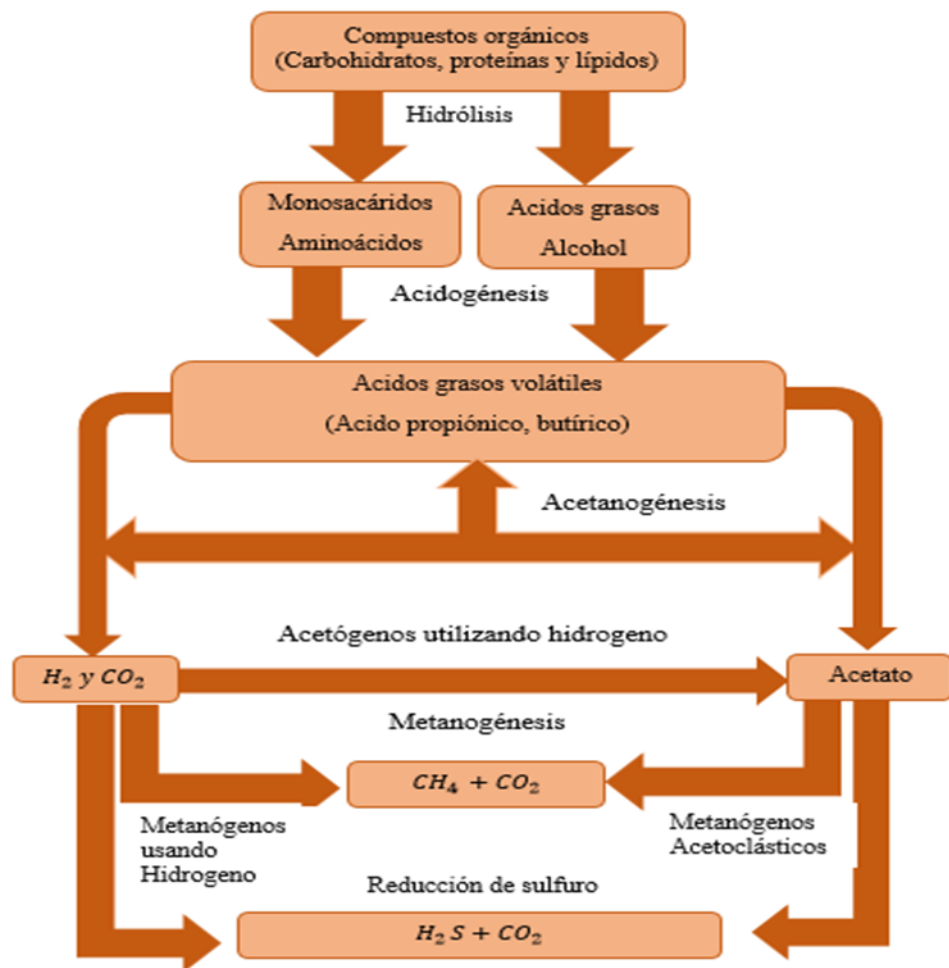


Figura 1. Etapas del proceso de digestión anaerobia y los microorganismos envueltos en ella. Fuente: adaptado de De Lemos, Chernicharo. (2007)

En la hidrólisis, los polímeros complejos insolubles como los carbohidratos, lípidos, proteínas y otros compuestos son convertidos en moléculas solubles menos complejas. Esta etapa, es considerada relativamente lenta por lo que puede limitar la velocidad de todo el proceso de DA. (PRAMANIK et al., 2019)

En la acidogénesis, los microorganismos convierten los compuestos solubles (monómeros y azúcares) resultantes de la hidrólisis, en moléculas simples como ácidos grasos volátiles, alcoholes, ácido láctico, entre otros. La acetanogénesis, se encarga de transformar dichos ácidos y demás compuestos en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. (PRAMANIK et al., 2019)

Los microorganismos metanogénicos, que son los encargados de la producción de biogás pueden utilizar dos formas para la obtención de metano, un grupo principalmente usa el acetato y el otro grupo usa principalmente H_2 y CO_2 . (ZHANG, SU, BAEYENS, & TAN, 2014) Aquellos que usan el ácido acético para producir metano, son llamados metanógenos acetoclásticos y aquellos que producen metano a partir de hidrogeno y dióxido de carbono son llamados metanógenos hidrogenotrófico. (De Lemos Chernicharo, 2015)

Dicho biogás, se compone principalmente de CH_4 , CO_2 y trazas de otros gases como el H_2S . Y la proporción de éstos gases, es del 55-70% metano y del 30-45% dióxido de carbono. Entre otros factores importantes a tener en cuenta, es que el biogás posee un contenido energético del $6.05-6.5 \text{ kWm}^{-3}$, su temperatura de ignición es de $650-750^\circ\text{C}$ y la densidad normal es de 1.2 kg m^{-3} . (RAO et al., 2010) La figura 1. muestra las diferentes etapas de la digestión anaerobia, los sustratos y los productos que son utilizados y transformados por los diferentes microorganismos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección presenta las diferentes metodologías usadas para el desarrollo de los objetivos de este trabajo. La figura 1. muestra las actividades generales que se realizaron.

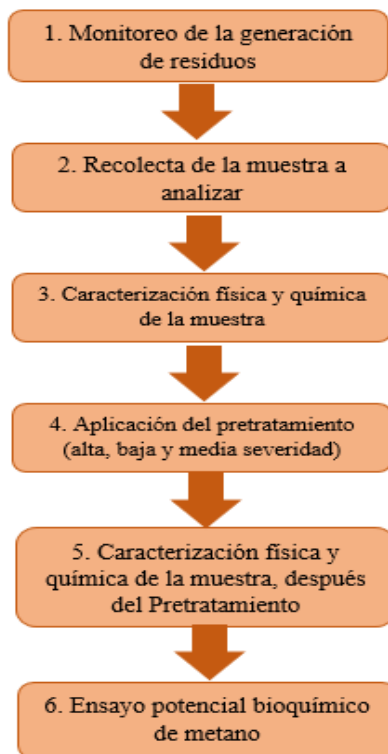


Figura 2. Flujograma de las etapas metodológicas

4.1 Monitoreo de la generación de residuos

El monitoreo se realizó durante 17 días continuos, de lunes a viernes en el REMOP; ubicado en 72, Calle. Cinco, 2, Ouro Preto - MG, Brasil. La generación de residuos, se clasificó de acuerdo a los sectores de preparación como lo muestra el siguiente la figura 3.

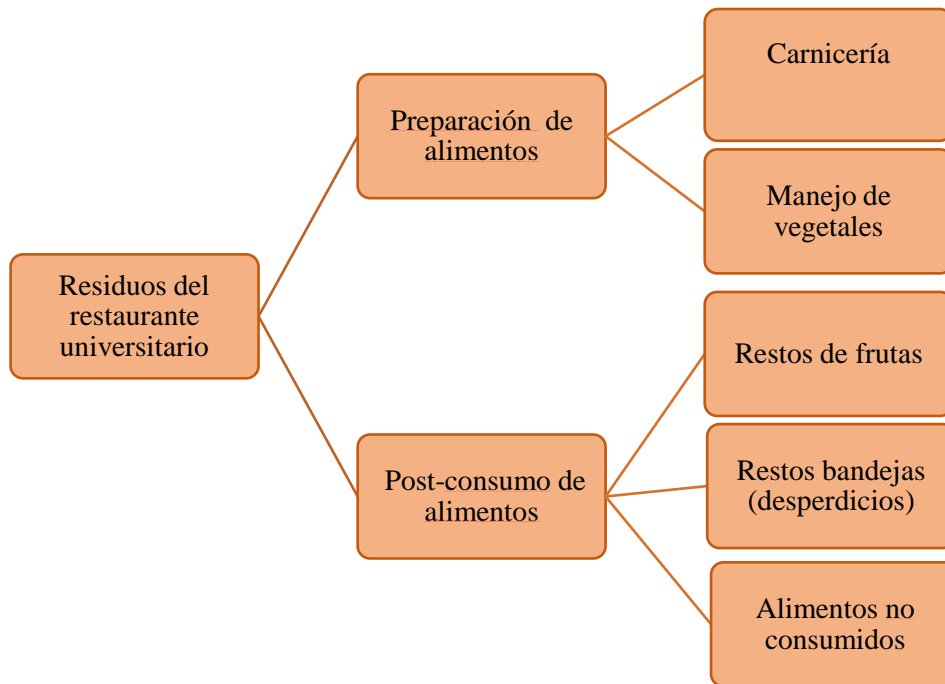


Figura 3. Clasificación de los residuos dentro del restaurante universitario

4.2 Recolecta de la muestra

La recolección de la muestra, se realizó en el último día de monitoreo y se realizó cuarteamiento en cada sector de acuerdo con la metodología establecida por la norma brasilera ABNT NBR 10007 sobre el muestreo de residuos sólidos, con el fin de que la muestra fuera homogénea, que la muestra contenía carne, chorizo de cerdo, arroz, fríjol y vegetales (lechuga, zanahoria, pepino). Para dicho procedimiento, se utilizó una carpa de aproximadamente 1,50 m x 1,50m, donde fueron mezclados los residuos de cada tipo y con ayuda de una pala, se les dio volteo hasta que quedaron totalmente homogenizados. Luego, la mixtura fue dividida en cuatro partes iguales, de las cuales se tomaron 2 diagonales. Y se repitió el proceso hasta que se obtuvo una porción más o menos equivalente a 2 kilogramos.

4.3 Caracterización física y química

Una vez se recolectaron las muestras de cada tipo de residuos, se tomó parte de cada muestra para formar una nueva muestra compuesta, es decir en proporciones de acuerdo al porcentaje generado de cada sector, con un total de 2 kg de muestra.

4.3.1 Granulometría de la muestra

Para el ensayo granulométrico, se consideró la reducción del tamaño de partícula de la muestra, por lo cual se analizó antes y después del premezclado, durante 5 minutos en una licuadora industrial de baja rotación COLOMBO, mod BR 2L. La

muestra mezclada, se llevó a la estufa de recirculación marca Solab (Modelo SL 102) durante 24 horas.

Para el tamizado, se emplearon tamices con malla número 5 (4mm), 10 (1,7mm), 32 (0,5mm) y 48 (0,3mm). Donde una vez se retiró la muestra de la estufa, se adicionó en la columna de tamices, que estuvo en el agitador de tamices Bertel, N 2723- serie 0607, durante 15 minutos.

4.3.2 Porcentaje de humedad

El contenido de humedad de la muestra, se determinó siguiendo la metodología descrita por Arantes, Y (2018). En la balanza OHAUS, modelo MB25, se pesaron 0,50 gramos de la biomasa en la balanza termogravimétrica, que elevó la temperatura de la muestra a 110°C, hasta que la variación de la masa fuera despreciable. De este modo, se calculó el contenido de humedad de la relación porcentual, entre la pérdida de masa durante el calentamiento y la masa utilizada inicial, siguiendo la ecuación 1.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (1)$$

Donde m_i = la masa total de la muestra

m_f = la masa seca

4.3.3 Determinación de sólidos totales, volátiles y fijos

La determinación de los sólidos se determinó siguiendo la metodología descrita por Arantes, Y (2018). Se colocaron las cápsulas previamente rotulas, en la mufla a 525°C durante 2 horas, luego se retiraron cuando la temperatura llegó hasta los 150°C. Se dejaron enfriar en el desecador y se pesaron con una masa bruta de aproximadamente 5 gamos (p_0). Posteriormente, se llevaron al horno a 105°C por 24 horas, se dejaron enfriar y luego se pesaron (p_1). Seguidamente, se llevaron a la mufla a temperatura de 525°C por 2 horas, a una tasa de calentamiento de 2°C/min. Finalmente se retiraron de la mufla, se llevaron al desecador para el enfriamiento y se pesaron nuevamente (p_2). El cálculo de los sólidos totales, volátiles y fijos, se hizo mediante las siguientes ecuaciones 2, 3 y 4:

$$\% \text{ Sólidos totales} = \frac{(p_1 - p_0)}{p_{\text{muestra}}} * 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Sólido totales volátiles} = \frac{(p_1 - p_2)}{p_{\text{muestra}}} * 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Sólidos totales fijos} = \frac{(p_1 - p_0)}{p_{\text{muestra}}} * 100 \quad (4)$$

4.3.4 Carbono orgánico total

Para la determinación de carbono orgánico total, se utilizaron cápsulas pequeñas de forma ovalada, se pesaron aproximadamente 167 mg de muestra en base húmeda, del sustrato en bruto y de la fracción sólida resultante del pretratamiento (125°C, 160°C, 180 °C). Una vez se dejó calentar el equipo hasta alcanzar la temperatura de trabajo, se llevaron las cápsulas a él durante un tiempo estimado de 5 minutos por cada muestra. El equipo utilizado para la cuantificación de los compuestos orgánicos presentes, fue de la marca Shimadzu, serie TOC-L. Este analizador, realizó el proceso de oxidación catalítica, por combustión a 900 °C.

4.3.5 Determinación de Demanda Química de Oxígeno:

La determinación de la DQO, se realizó mediante la metodología UNE77004:2002, especial para muestras sólidas. La cuantificación de la DQO para las muestras antes y después de aplicar el respectivo tratamiento hidrotérmico, se realizaron de acuerdo a: Arantes, Y. (2018). Donde primeramente, se preparó un blanco vertiendo 10 mL de agua destilada en un tubo, luego se adicionó lentamente 20 mL de la solución digestora (0,2 M de $K_2Cr_2O_2$) y 30 mL de la solución catalítica (10g/L de $AgSO_4$ en H_2SO_4). Para la cuantificación de DQO de muestras sólidas, se tomó 0,1g de la biomasa en base seca y 10 mL de agua destilada. Ya para la medición de DQO líquida, que corresponde a los hidrolizados obtenidos después del pretratamiento, se adicionó 1 mL de la fracción líquida de la muestra y 9 mL de agua destilada. Para ambos tipos de muestras, se agregó la solución digestora y catalítica de la misma manera que en la preparación del blanco. Con esa dilución, se garantizó que los valores de DQO estuvieran dentro del rango lineal del método (entre 30 mg/L y 1900 mg/L). El protocolo restante fue el mismo para los dos tipos de muestra.

Una vez se agregaron las soluciones, se acoplaron los condensadores a los tubos digestores, de modo que el proceso ocurrió en reflujo abierto. Los tubos se colocaron

en el bloque digestor de la marca TECNAL modelo 040/25, previamente calentado a una temperatura de $151 \pm 2^\circ\text{C}$. La digestión se realizó durante dos horas.

Posterior a ello, se retiraron los tubos del bloque y se colocaron en un soporte para enfriar hasta temperatura ambiente. Una vez los tubos enfriaron, se desacoplaron los condensadores y cada muestra se llevó a un erlenmeyer de 500 mL, que se completó con 440 mL de agua destilada. Además, se adicionaron 10 gotas de indicador de felorroína. Con sulfato ferroso amoniacal (FAS), previamente preparado como se describe en el siguiente párrafo, se tituló. El procedimiento se realizó con una lámpara de luz blanca, que facilitó la observación instantánea del viraje de la muestra, de modo que los erlenmeyers, estuvieron en agitación magnética moderada, mientras se adicionó el FAS hasta el punto de viraje, que se caracterizó por un tono marrón.

La solución de sulfato ferroso amoniacal que se utilizó como titulante, se preparó por medio de la disolución de 200 g de $Fe(NO_3)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ en 500 mL de agua destilada, adicionándose lentamente un volumen de 40 mL de $H_2SO_4(96\%)$. El volumen de la solución, se completado con agua destilada hasta 1,0 L. En la normalización del FAS, se adicionó a un erlenmeyer de 500 mL: 10 mL de solución patrón de $K_2Cr_2O_7$ (1 N; $0,166 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 30 mL de H_2SO_4 (96%) y 460 mL de agua destilada. La titulación se realizó conforme a lo descrito para las muestras de la digestión y el volumen de FAS consumido es anotado. Así, el cálculo de la normalización se realizó por medio de la siguiente ecuación 5:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (5)$$

Dónde:

C_1 , es la concentración de la solución patrón de $K_2Cr_2O_7$ (1N);

V_1 , es el volumen de la solución patrón utilizado (10 mL);

C_2 , es la concentración de la solución FAS (N);

V_2 , es el volumen de FAS gastado en la titulación (10 mL).

Conociendo la normalización de la solución de FAS, la demanda química de oxígeno (DQO) de las muestras sólidas es calculada por la ecuación 6:

$$DQO = \frac{V_b - V_a * 8 * N}{m_{BS}} \quad (6)$$

Donde:

DQO, es la demanda química de oxígeno de la muestra ($\text{mg } O_2 \cdot \text{g}^{-1}$);

V_b, es el volumen de FAS consumido en la titulación del blanco (mL);

V_a, es el volumen de FAZ consumida en la titulación de la muestra (mL); N, es la normalidad de la solución de FAS (N);

M_{bs}, es la masa de residuos em base seca (g).

Ya la demanda química de oxígeno (DQO) de las muestras líquidas es dada por la ecuación 7:

$$DQO = \frac{V_b - V_a * 8000 * N}{v_H} \quad (7)$$

Donde:

DQO, es la demanda química de oxígeno de la muestra ($\text{mg } O_2 \cdot \text{g}^{-1}$);

V_b, es el volumen de FAS consumido en la titulación del blanco (mL);

V_a, es el volumen de FAZ consumido en la titulación de la muestra (mL);

N, es la normalidad de la solución de FAS (N);

V_H, es el volumen de muestra líquida (hidrolizado) utilizado (mL).

4.3.6 Lípidos

La metodología que se utilizó en la determinación de lípidos, sigue la norma EEC (Comunidad económica europea) N° 2568/91, que fue adaptada por Arantes, Y. (2018) a lo siguiente. Se utilizó un extractor de aceites y grasas de la marca Solab (Modelo SL 202/6) y ciclo hexano como solvente. Los frascos remolque se secaron en la estufa previamente durante una noche, se dejaron enfriar en un desecador y se pesaron p_0 .

La humedad de la muestra de laboratorio, se midió en una balanza de humedad, se pesaron aproximadamente 10 gramos de muestra en base seca, en un cartucho de papel filtro previamente pesado y tarado, que se colocó en reflujo por 2 horas con el solvente. Trascorrido el tiempo, el tubo recuperador de solvente se encajó y se dejó por 2 horas más. Los frascos reboiler, se llevaron a la estufa de circulación a 105°C por 10 minutos, se dejan enfriaron en el desecador y se pesaron. El procedimiento de colocar los tubos en la estufa, enfriar y pesar, se repitió hasta conseguir un peso constate p_1 . La ecuación 8, fue utilizada para el cálculo de los lípidos.

$$\%Lípidos = \frac{(Peso Fr. final) p_1 - (Peso Fr. inicial)p_0}{M \text{ masa de la muestra en base seca}} \quad (8)$$

4.3.7 Extractivos

El análisis de extractivos, se realizó siguiendo la metodología descrita por Arantes, Y. (2018) se midió el contenido de humedad, de la muestra del análisis de lípidos en la balanza de humedad. Entonces, la masa restante se pesó y se colocó en un cartucho hecho con papel filtro. Se adicionó 125 mL de etanol y 125 mL de ciclo-hexano en un balón volumétrico de fondo redondo de 1000 mL. El sistema Soxhlet, se colocó en marcha durante 48 horas, que tarda la extracción.

La muestra restante de los extractivos, se filtró al vacío en un embudo de Buchner, lavándose con 300 mL de agua destilada. Posteriormente, la biomasa fue secada en la estufa de circulación de la marca Solab (Modelo SL 102) por 24 horas a 40°C. Después del secado la muestra, la muestra se pesó y nuevamente se llevó a la balanza de humedad. El cálculo del porcentaje de extractivos, se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación 9:

$$\%Ext. = \frac{Masa \text{ inicial}_{base \text{ seca}} - Masa \text{ final}_{base \text{ seca}}}{Masa \text{ inicial}_{base \text{ seca}}} \times (100) \quad (9)$$

4.3.8 Contenido de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

El Nitrógeno total Kendal, se determinó siguiendo la metodología establecida por Standard Methods 4500-Norg B APHA, 2012. El principio se basa, en someter una muestra a digestión en medio ácido, en presencia de sulfato de potasio y sulfato de cobre para la conversión de todo el nitrógeno orgánico a $N - NH_4^+$. El nitrógeno orgánico es el resultado de la diferencia entre el nitrógeno amoniacal y el resultado en este análisis.

Primeramente, se tomó aproximadamente 0,60 g de la masa (bruta y de las fracciones sólidas de las masas resultantes de cada pretratamiento) en base húmeda, que equivale a 0,1 g en base seca aproximadamente. Se preparó un blanco siguiendo el mismo procedimiento para cada una de las muestras. Las muestras, se colocaron en erlenmeyers de 500 mL y se adicionó 350 mL de agua destilada. Enseguida se adicionó 50 mL de la solución digestora de nitrógeno y luego se llevó cada Erlenmeyer a la placa calefactora a una temperatura entre 380°C y 400°C.

Se tuvo en cuenta, que la temperatura no excediera los 410°C porque acarrearía pérdidas del H_2SO_4 y consecuentemente de nitrógeno. Cuando se visualizó humo en el

erlenmeyer, se esperó 30 minutos, luego se retiraron y se dejaron enfriar. Luego del tiempo de enfriamiento, se transfirió cada una de las muestras a un balón Kendal y se lavó con agua destilada para que todo el residuo de la digestión se transfiriera para el balón de destilación.

En el balón de destilación se adicionó 100 mL de agua destilada, luego se adicionó 50 mL de la solución de hidróxido de sodio y tiosulfato de sodio a la taza dosificadora del destilador. En un Erlenmeyer de 250 mL, se colocó 50 mL de la solución indicadora de ácido bórico, se abrió la llave del destilador y se conectó al balón Kendal, luego se abrió lentamente la llave de la taza dosificadora y se lavó con agua destilada. Se conectó el destilador de nitrógeno y el nivel, luego se desligó y se conectó el calentamiento. Se dejó destilar hasta completar aproximadamente 250 mL en el Erlenmeyer, la solución viró a verde cuando hubo presencia de nitrógeno.

Seguidamente se hace la titulación utilizando solución de ácido sulfúrico 0,02 N, hasta que la solución viró a una coloración lavanda pálido y se anotó el volumen consumido. Para obtener la concentración de nitrógeno en cada una de las muestras, se realizó el siguiente cálculo, con la ecuación 12.

$$N_{org} = NTK - NH_4^+$$

$$\frac{mg}{g} \text{ de } NTK = \frac{(A - B) * 0,02N * FC * \frac{14000mg}{eq} N}{masa \text{ de la muestra } (g)} \quad (12)$$

Donde:

A= Volumen de la solución de ácido sulfúrico 0,02 N, consumido en la titulación (mL)

B= Volumen de la solución de ácido sulfúrico 0,02 N, consumido en la titulación del blanco (mL)

FC= Factor de corrección de la normalidad de la solución de ácido sulfúrico 0,02 N

El resultado que se obtuvo en esta metodología, se usó para la cuantificación de las proteínas. Que de acuerdo con la (FAO, n.d.), el porcentaje de proteínas, se calcula mediante la ecuación a seguir:

$$\%Proteínas = \%NTK * 6,25 \quad (13)$$

Donde:

6,25= es el factor de conversión generalmente usado para alimentos

4.3.9 Determinación de iones

La fracción líquida, resultado del pretratamiento hidrotérmico a diferentes temperaturas, se sometió a análisis de cromatografía de iones para conocer el comportamiento del nitrógeno amoniacal cuando es puesto a autohidrólisis. Para ello, se tomó parte del hidrolizado y se filtró con membranas de acetato de celulosa de 0,45 μm , los diferentes elementos como el Ca^+ , Na^+ , K^+ , Li^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , entre otros se determinaron mediante un cromatógrafo de iones modelo Metrohm, equipado con detector 732 – IC e columna Metrosep A SUPPP 5 – 250 Metrohm. Este cromatógrafo tenía como fase móvil el

4.4 Pretratamiento hidrotérmico de la muestra de residuos

Para evaluar los efectos de las variables de temperatura y tiempo, se sometió a pretratamiento de alta, media y baja severidad. La severidad, es el término que se usa para medir el impacto generado por la temperatura y el tiempo, en la composición de la muestra. Dichos valores son $R_{baja}=2.38$, $R_{media}=3.41$ y $R_{alta}=4.0$, respectivamente. La ecuación 13. propuesta por Overend et al, muestra cómo se calcularon.

$$\log R_0 = \log \left\{ t * \exp \left(\frac{T - T_{ref}}{14,75} \right) \right\} \quad (14)$$

Donde:

t = es el tiempo empleado

T = temperatura de reacción $^{\circ}\text{C}$

T_{ref} = es la temperatura de referencia (100°C)

14,75= es el valor ajustado, con base a la energía de activación.

Para el pretratamiento por autohidrólisis de los residuos, se usó reactores tubulares de acero 316 L de autoclave, con anillo de sellado de politetrafluoroetileno (PTFE) y un volumen útil de 217 mL. La razón líquida: sólido (RLS) se fijó a 5:1, ya que la humedad de la muestra era de 4:1.

La masa de la muestra de residuos, que se usó durante los ensayos planeados fue de 235 gramos. El sistema se calentó a las temperaturas definidas (125°C, 160°C y 180°C) por 45 minutos a baño caliente, que usó glicerina como fluido de calentamiento. Pasado el tiempo determinado para la condición, el reactor se sumergió en un recipiente con agua y hielo, con el objetivo de disminuir la conversión de los carbohidratos a compuestos indeseados para los microorganismos. Posteriormente, el contenido de los reactores, se filtró de forma manual, con el objetivo de separar la fracción sólida y el hidrolizado hemicelulósico, el volumen se midió en una probeta y la fracción sólida se pesó en una balanza analítica para evaluar la pérdida de masa durante el ensayo.

$$P_M = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

m_i = es la masa de entrada

m_f = s la masa de salida, después del pretratamiento

4.5 Ensayos del Potencial Bioquímico de Metano

Las pruebas de digestión anaerobia, para la evaluación del potencial de producción de CH_4 , se realizó en lotes utilizando como sustrato las fracciones orgánicas residuales en una proporción de 13% de sólidos totales. Para los ensayos de PBM en una única etapa, se utilizó frascos reactores de vidrio de 120 mL, se dejó 60 mL de volumen útil y el restante como headspace. Para este ensayo se usó dos relaciones alimento: microorganismo (A/M) que corresponden a 0.5g SV/g SV y 3g SV/g SV, con el fin de tener un acertamiento a cuál podría ser la relación A/M que genera un mayor rendimiento de producción de metano. El pH se ajustó a 9,0 y se purgó con $N_2(g)$ durante 5 minutos y luego se selló con las tapas de goma. Posteriormente, se llevó los frascos a la incubadora Shaker de la marca Thoth®, modelo 6440, a una agitación de 140 rpm y a temperatura de $35 \pm 2^\circ C$ para favorecer la actividad microbiana de las bacterias metanogénicas. También se preparó un blanco o padrón, para la cuantificación del metano endógeno y después de la estabilización de la producción de metano.

El inóculo anaeróbico que se usó para las pruebas PBM, fue una mistura de lodo de UASB alimentado con agua residual, en escala de demostración en el Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG-

COPASA) con estiércol bovino fresco en una proporción 50:50 (% SV/SV) . El inóculo fue previamente incubado, antes del inicio de las pruebas durante tres días a 35°C, para eliminar la producción de metano, a partir de la biodegradación de cualquier material orgánico residual.

La producción de biogás y la composición de metano, se monitorearon diariamente, midiendo la presión acumulada en cada frasco, con un manómetro diferencial de la marca CCE. Para la composición de metano en el biogás, se tomó una muestra de 0,5 mL del gas producido, después de ser medida la presión del frasco y se inyectó con una jeringa gastight 2.5 mL en el cromatógrafo de fase gaseosa Shimadzu GC-2014 (equipado con un detector de conductividad térmica operado a una temperatura de 120°C, una columna capilar de tamiz molecular (5A) de la Marc Restek, llenada con fase estacionaria Msieve 5Å, trabajando a una temperatura de 120 °C, con nitrógeno 5.0 como gas de arrastre, en velocidad linear de 23,8 mL.min-1)

Todos los valores de potencial bioquímico de metano (PBM) (NmL.kg DQO-1), se presentan en las condiciones normales de temperatura y presión (CNTP: 273K; 101315 Pa). Después del monitoreo, la fracción soluble se analizó por cromatografía líquida de alta eficiencia, para evaluar los substratos generados durante las etapas de DA.

4.5.1 Determinación del contenido de celulosa y hemicelulosa

Este análisis se realizó, siguiendo el procedimiento descrito por Arantes, Y (2018) de acuerdo a lo siguiente, luego de la etapa de monitoreo de los frascos reactores del ensayo de PBM, se quitó el sellado y se tomó una muestra de cada uno en pequeños falcones de 1 mL, que luego se llevaron a la centrifuga marca Herolab modelo microCen 16, durante 15 minutos a 15000 rpm para facilitar el filtrado. Se tomó la parte del sobrenadante y se filtró con membranas de nitrato de celulosa, que tiene un tamaño de poro igual 0,45 µm. Luego en viales de determinación de contenido de celulosa y hemicelulosa, se adicionó una dilución preparada con 450 µL de agua milliq y 50 µL de filtrado y se llevaron a análisis. El análisis se realizó en un sistema HPLC-UV Shimadzu (Kyoto, Japan) compuesto de una bomba modelo (LC-20AD), desgasificador (DGU-20A3), controlador (CBM- 20A), inyector automático (SIL-20AC), detector UV- Vis (SPD- 20A) y horno de columna (CTO- 20A).

Para la determinación de azúcares, se usó un detector de índice de refracción, mientras que para los ácidos orgánicos y los aldehídos se usó un detector UV-Vis

operado en canal duplo, con longitudes de onda iguales a 210 nm para de ácidos y 274 nm para de FF e HMF.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Monitoreo de la generación de residuos

El monitoreo de los residuos en el restaurante universitario, se realizó durante 17 días, iniciando desde el día 1 de agosto hasta el 17 de agosto del presente año. El monitoreo consta de dos etapas, la primera etapa se realiza en temporada vacacional y la segunda en temporada estudiantil. La figura 4, muestra la media general de la producción de residuos en temporada vacacional y del inicio de clases.

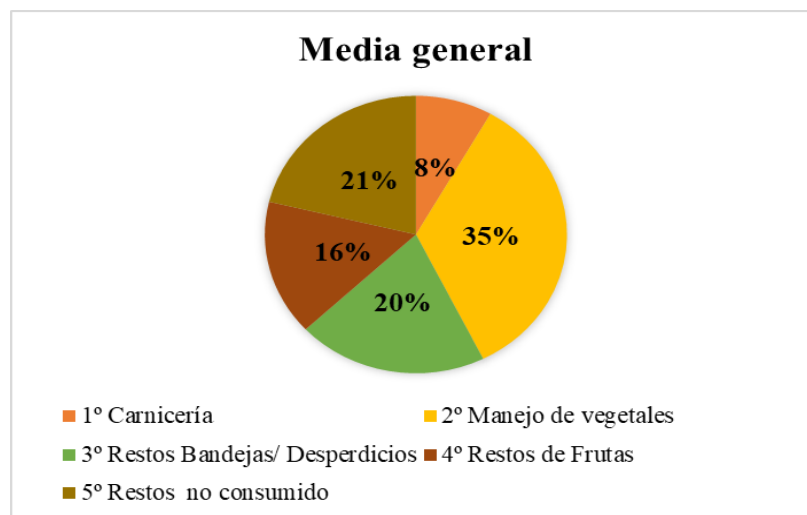


Figura 4. Producción porcentual de residuos durante el monitoreo

De acuerdo a la figura 4. La composición porcentual de residuos en el restaurante, deriva del manejo de vegetales para la preparación de ensaladas con un 34,4%, seguido de los alimentos no consumidos con un 21,4%, los restos de bandejas o desperdicios con un 20,4%, restos de frutas con un 15,8% y restos de la preparación de las carnes con un 8,2%, respectivamente. La cantidad de residuos que se genera diariamente, esta directamente relacionada con la cantidad de usuarios, que varia entre los 400-4000 personas, dependiendo de factores como el menú del día, la calidad climática entre otras. Normalmente para la temporada vacacional el número de usuarios es de 350 a 700 personas y para la temporada estudiantil es de 2000 a 4000 personas. El menú diario, es establecido por las directivas del restaurante en compañía de la empresa Nutrir refeicoes Ltda, quienes tienen definido una dieta balanceada rica en cereales, legumbres, vegetales y frutas.

5.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra en Bruto

La muestra evaluada contenía 35% de residuos del manejo de vegetales (zanahoria, lechuga, repollo, tomate), 21% de alimentos no consumidos (arroz, frijoles, carne, chorizo), 20% de los residuos de las bandejas, 16% de restos de fruta (cascaras de naranja y melón) y 8% de residuos del manejo de carne bovino.

5.2.1 Análisis granulométrico

El tamaño de los residuos antes de ser triturados, se caracterizaron por poseer un tamaño de partícula igual o mayor a 4mm, ya que el 76% de la muestra fue retenida en el primer mesh (5). Luego que la muestra es sometida a trituración, se reduce significativamente el tamaño de las partículas, obteniéndose en su mayoría un porcentaje de muestra del 51% equivalente a de 1,7 mm. Lo anterior de evidencia en la figura 5.

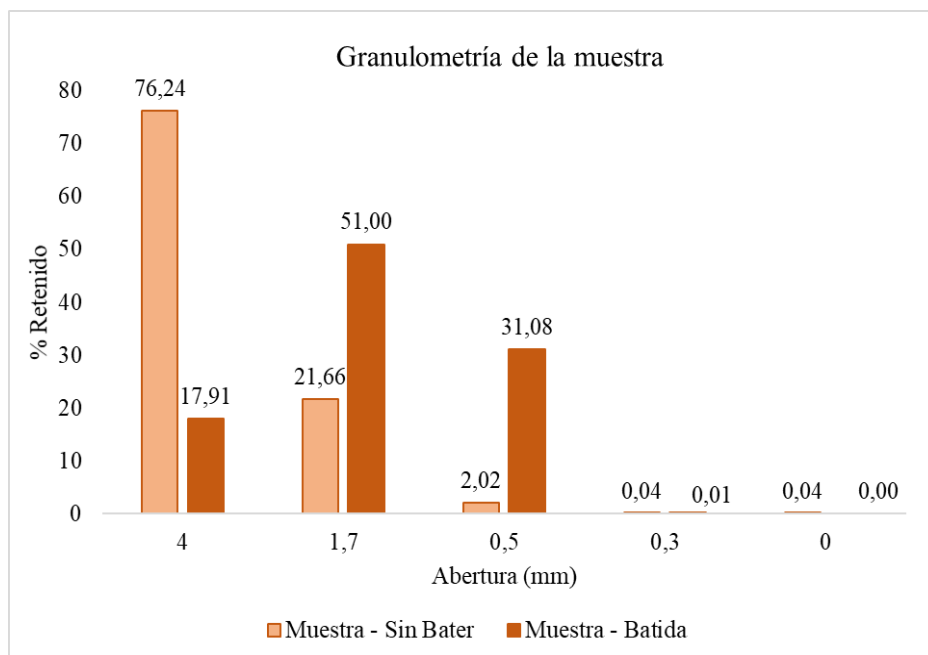


Figura 5. Granulometría de la muestra antes y después de ser sometida a trituración

Bong et al., (2018), en su estudio hace uso de materiales con un tamaño menor a 2 mm, con lo que logra obtener un mayor contenido de y por ende una mayor producción de biogás. Es por ello, que en este estudio las fracciones de partícula usadas, fueron aquellas que pasaron por el tamiz 5 y fueron retenidas en el tamiz 10, consiguiendo tener el tamaño recomendado por la literatura.

El tamaño de las fracciones de la muestra, son de gran importancia en DA, ya que de acuerdo con Mirmohamadsadeghi, Karimi, Tabatabaei, & Aghbashlo, (2019) un tamaño

de partícula pequeño, proporciona un área de superficie disponible más grande, permitiendo que la materia orgánica soluble entre en contacto más fácilmente con las exo-enzimas de los microorganismos, facilitando la degradación. Sin embargo, la reducción severa del tamaño de los residuos, puede conducir a la acumulación de ácidos grasos y consecuentemente reducir el rendimiento de metano. (MIRMOHAMADSADEGHI et al., 2019)

5.2.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra en bruto

Las características tanto físicas como químicas de la muestra de residuos alimenticios (residuos de carne, vegetales, legumbres y frutas), se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de la muestra en bruto

Parámetros Físico-químicos	
% Humedad	80,7
%ST	19,3
%STV	18,3
%COT-BS	52,7
DQO (mg/g)	1426
%Lípidos	25,4
%Carbohidratos	22,8
%Proteínas	10,7
C/N	30,8
%Celulosa	21,9
%Hemicelulosa	0,89
%Extractivos	49,5

Los parámetros anteriores, se analizan teniendo en cuenta la base seca del sustrato que de acuerdo a diferentes consultas acerca de la caracterización fisicoquímica de residuos alimentarios realizadas por diferentes autores, se obtienen valores como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de la literatura consultada

Parámetros	Yong et al.,(2015)	Kuczman et a l., (2018)	Pramanik et al., (2019)	Este estudio
% Humedad	80	84,7	80,8	80,6
%ST	20	15,28	19,2	19,3
%STV	19,2	13,02	18,4	18,3
%Lípidos	25,3	15,0	30,3	25,4

%Carbohidratos	-	-	41,2	22,8
%Proteínas	-	-	28,3	10,7

La caracterización física de la muestra de residuos alimenticios del restaurante universitario, posee 19,3% de sólidos totales, de los cuales 94,7 % son sólidos totales volátiles y tan sólo el 5,38% son sólidos totales fijos. Los datos están de acuerdo con otros autores como Yong, Dong, Zhang, & Tan, (2015), que en su estudio sobre la producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia de residuos de alimentos y paja, obtuvo en la caracterización de los residuos alimentares valores de 20% ST y 19,9% de STV. Así mismo, Kuczman et al., (2018); Pramanik et al., (2019) obtuvieron valores para la fracción orgánica, es decir para los sólidos volátiles de 85,21% y 95,8%, respectivamente.

Sheng et al., (2013) también en su estudio sobre los efectos del amoníaco y nitrato en la producción de biogás a partir de residuos alimenticios vía digestión anaerobia, obtuvieron valores de ST y STV en la caracterización de 27,59% y 25,91% respectivamente. Sin embargo, Bong et al., (2018) en su estudio sobre caracterización y tratamiento de residuos alimenticios para mejorar la producción de biogás durante la DA, recomiendan que el contenido de sólidos totales sea menor al 25%, para evitar posibles fallas que están asociadas a la tasa de carga orgánica que es un parámetro operacional y se define como la cantidad de sólidos secos que se pueden alimentar por día. Así cuando el contenido de sólidos totales, es superior al adecuado se podrían acumular sustratos inhibidores como los ácidos grasos.

Por consiguiente, de la comparación de los datos obtenidos en este estudio con la literatura, se infiere que los residuos alimenticios del REMOP, respecto al contenido de sólidos totales y fracción orgánica, se encuentran dentro de los parámetros encontrados por los autores.

Con referencia al contenido de **carbohidratos, proteínas y lípidos**, en este estudio se obtuvo valores de 22,8%, 10,7% y 25,4% respectivamente. En comparación con los datos obtenidos por Pramanik et al., (2019), los valores para dichos compuestos fueron de 41,2%, 28,3% y 30,3%. Cabe resaltar que estos datos son variables de un estudio para otro, debido a que, en este tipo de características de los residuos, pueden incidir

desde los cambios geográficos, el tipo de fuente de recolección y los métodos utilizados para la determinación de dichos compuestos.

Sin embargo, son varias las consideraciones que se tienen al respecto sobre los compuestos orgánicos, pues un sustrato con alto contenido de carbohidratos puede tener mayor rendimiento de biogás, en comparación con un sustrato con alto contenido de proteínas o lípidos; esto lo confirma Alibardi & Cossu, (2016) en su estudio sobre los efectos del contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos en la producción de hidrogeno, ya que al someter muestras con diferente composición de carbohidratos, lípidos y proteínas obtuvo mayor rendimiento de biogás con el sustrato con mayor porcentaje de carbohidratos, puesto que estos son más rápidamente biodegradados.

El porcentaje de los **carbohidratos**, fue obtenido a partir del análisis de celulosa y hemicelulosa, que para el sustrato fue de 21,9% de celulosa y 0,89 de hemicelulosa, por consiguiente, la mayor parte de los carbohidratos serán aprovechados rápidamente por los microorganismos, en forma de azúcares que es el alimento de preferencia de los microorganismos.

Yong et al.(2015); Kuczman et al.(2018); Pramanik et al.,(2019), en sus estudios obtuvieron valores del **contenido lipídico** de 25,3%, 15,0% y 30,3% respectivamente. Por tanto, el sustrato en términos de contenido lipídico, se asemeja a los datos obtenidos por la literatura, pues el porcentaje de lípidos en este estudio es de 25,4%.

Respecto al **contenido proteico** este es del 10,7%, este es un valor aceptable para la DA, ya que de acuerdo con Pramanik et al., (2019) el porcentaje de proteínas puede presentarse en un rango de 2,3-28,4%. Esto implica, que tanto proteínas como carbohidratos, serán el material más rápidamente degradado por los microorganismos, pues poseen una mayor tasa de hidrólisis debido a su alta biodegradabilidad, en comparación con los lípidos.

La relación **C/N**, aquí obtuvo un valor de 30,8, es decir que de acuerdo con (Zhang et al., 2014), es un valor muy cercano al rango óptimo de C/N para el buen funcionamiento de la DA, que se encuentra entre 20-30. Esta variable es de gran importancia, debido a que esta no solo ayuda a mantener un ambiente apto para el crecimiento de los microorganismos, sino también provee un adecuado balance de nutrientes en el medio. (PRAMANIK et al., 2019)

Cuando el sistema presenta una alta relación C/N, se genera baja tasa de solubilización de las proteínas, conduciendo a una baja capacidad tampón en el sistema; por el contrario, una baja relación C/N aumenta la posibilidad de inhibición del amoníaco, debido al alto contenido de ácidos grasos volátiles. (KUCZMAN et al., 2018)

5.3 Influencia del pretratamiento térmico en los residuos alimentarios

Con el fin de conocer el comportamiento de los residuos alimenticios a la aplicación del pretratamiento térmico que se realizó a baja, media y alta severidad, $R_{baja}=2.38$, $R_{media}=3.41$ y $R_{alta}=4.0$, respectivamente. la tabla 3 y 4. muestran la caracterización fisicoquímica del sustrato luego de ser sometido a diferentes temperaturas, durante un mismo tiempo.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de la fracción sólida, resultante del pretratamiento

Parámetro	Pretratamiento 125°C	Pretratamiento 160°C	Pretratamiento 180°C
% ST	15,07	14,91	13,82
% STV	14,19	14,04	12,95
% COT-BS	56,74	49,15	53,51
DQO (mg/g)	2144	2775	3855
% Pérdida de masa	48	79	87
%Proteínas	20,8	23,9	28,6
C/N	17,92	12,88	11,67

Tabla 4. Caracterización de la fracción líquida (hidrolizado), resultante del pretratamiento

Parámetro	Pretratamiento 125°C	Pretratamiento 160°C	Pretratamiento 180°C
DQO (mg/L)	785,667	924,832	958,032

La temperatura y el tiempo de pretratamiento, son una de las variables importantes a tener en cuenta en la autohidrólisis de los residuos alimenticios, ya que lo que se pretende es tener una estimativa de las condiciones adecuadas del proceso, para un alto rendimiento de biogás. Según Srisowmeya et al., (2019) las temperaturas altas en el tratamiento de residuos alimenticios, puede acarrear alta pérdida de compuestos volátiles, que se traduce

en ácidos grasos y azúcares fermentables que constituyen la principal fuente de alimento para los microorganismos en el proceso de biometanización. Sin embargo, al aplicar el pretratamiento, se evidencia el aumento de la materia orgánica soluble.

En función de los datos obtenidos, es posible observar que la aplicación del tratamiento hidrotérmico por autohidrólisis, tiene un efecto positivo sobre los residuos alimentarios. Ya que principalmente se tiene una alta conversión de la fracción sólida, esto se evidencia mediante el porcentaje de pérdida de masa que es 48%, 79% y 87% para los pretratamientos con temperatura de 125 °C, 160 °C y 180 °C respectivamente. Por ende, cuando se aumenta la temperatura en el pretratamiento, se presenta una transferencia de masa, es decir que debido al gradiente de temperatura parte del sustrato será esta de forma líquida que significa. Sin embargo, la fracción sólida presenta un aumento de la DQO, lo que resulta confuso, pero se puede decir que esto se debe a que parte de la materia orgánica solubilizada queda en superficie de las fibras del sustrato que es la fracción sólida.

Una vez es aplicado el pretratamiento hidrotérmico, la relación C/N presenta una disminución la cual se debe principalmente a la transformación del carbono presente en la materia orgánica y el aumento del nitrógeno, pues primeramente la disminución del carbono se debe a que al someter el sustrato al pretratamiento, el carbono es transformado rápidamente en compuestos más simples como azúcares, aminoácidos entre otros; mientras que el aumento del nitrógeno se debe a la aparición de compuestos nitrogenados como el amonio, resultado de la transformación de las proteínas.

Evaluando los valores de DQO del hidrolizado mostrados en la tabla 4., se evidenció que las concentraciones de DQO aumentan con el incremento de la temperatura. Sin embargo, no ocurre lo mismo con la concentración de elementos metálicos, como se observa en la tabla 5. Pues con el aumento de la temperatura, la concentración de éstos disminuyó. En el estudio realizado por Srisowmeya et al., (2019) reportan que los iones de metales ligeros como el sodio, calcio y potasio, tienen un rol importante en la DA y que en condiciones mesófilas para las metanogénicas la concentración aceptable de sodio es de 350 mg/L y la de calcio oscila entre 150-300 mg/L.

De lo anterior, se infiere que el sustrato incluso antes de ser sometido al pretratamiento ya contenía alta concentración de Na^+ y K^+ , eso debido probablemente a que los alimentos

son preparados con alto contenido de sal. Los micro y macronutrientes, son importantes porque ayudan a aumentar la actividad de los microorganismos y también actúan como cofactores para síntesis y actividad enzimática. (SRISOWMEYA et al., 2019) Sin embargo, concentraciones muy elevadas de dichos componentes en la DA, pueden generar efectos letales en el proceso, como la inhibición y el desbalance de micro y macronutrientes, que afectan directamente la producción de biogás, que se discutirá más adelante.

Tabla 5. Concentración de los elementos presentes en la fracción líquida

Condición	Na^+ (mg/L)	Ca^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Li^+ (mg/L)	Sr^+ (mg/L)	Mg^+ (mg/L)	Ba^+ (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)
Bruto	1932	12,1	2077	1,6	7,94	-	-	148
P1-125°C	1936	97,4	-	0,38	12,6	-	-	60,1
P2-160°C	1881,3	78,1	1933,5	0	-	425,6	4,38	133,7
P3-180°C	1768,6	14,38	2070	0	16,64	-	-	401,54

Con respecto al amonio NH_4^+ , los valores obtenidos al someter el sustrato a pretratamiento con la temperatura de 125°C, 160°C y 180°C, son 60 mg/L, 133,3 mg/L y 401,5 mg/L N- NH_4 respectivamente. El amonio llama la atención, ya que al aumentar la temperatura aumenta su concentración en el medio y posiblemente la hidrólisis térmica conduzca a una elevada concentración de amoniaco NH_3 ; que a su vez dependiendo de la temperatura y el Ph una porción de él estará en el medio como nitrógeno amoniacal libre, llevando a la inhibición de los microorganismos acetanogénicos y por tanto a los metanogénicos. Sin embargo Yirong, Zhang, Heaven, & Banks, (2017) evidenciaron en su estudio que los valores en donde se podría presentar inhibición por nitrógeno amoniacal total, están generalmente en el rango de 3-5 g N. L⁻¹. Por lo que se infiere que en éste estudio no se presenta inhibición por nitrógeno amoniacal total.

5.4 Efectos del pretratamiento térmico y la relación alimento: microorganismo en la producción de biogás

De acuerdo, con Ge et al., (2016) el porcentaje de sólidos totales, para la digestión anaerobia de biomasa semisólida, esta entre (10-15%) de ST. Para los ensayos PBM de este estudio, se usó 13% ST y para ello se realizó la preparación del el inóculo y material residual, de manera que se cumpliera con el parámetro establecido anteriormente. La caracterización del inóculo, se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del inóculo

Parámetro	%ST	%SV
Estiércol	9,16	8,02
Lodo	15,88	9,49
Inóculo	12,53	8,87

Mirmohamadsadeghi, Karimi, Tabatabaei, & Aghbashlo, (2019), en su estudio analizan la importancia de la calidad y cantidad del inóculo, afirmando que es uno de los factores fundamentales en las cuatro etapas de la DA, por lo que el inóculo más apropiado es el lodo, junto con el estiércol de vaca, ya que posee diferentes microorganismos anaerobios metanogénicos, que pueden adaptarse fácilmente a las condiciones del proceso.

El día 1 de octubre se instaló el lote de ensayos PBM, el cual estaba compuesto por el sustrato sin pretratar como blanco y el sustrato pre-tratado a las relaciones A/M establecidas. A partir de ese día, se monitoreó la producción de biogás cada 24 horas. Durante los primeros 15 días de medición, se obtienen los valores de producción de metano, que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Producción de N mLCH₄/g SSV

Parámetro	Relación A/M	NmLCH ₄ /g de DQO
Bruto		1,97
P1-125°C		1,56
P2-160°C	0.5	1,49
P3-180°C		1,41
Bruto		0,43
P1-125°C		0,59
P2-160°C	3.0	0
P3-180°C		0

Para la relación F/M=3 y con las temperaturas más elevadas del pretratamiento (160°C y 180°C) no hubo producción de biogás durante los primeros días de monitoreo, por lo que estuvieron inhibidas totalmente siempre de lo cual se infiere que dicha relación es muy alta, ya que es mucho alimento para los microorganismos.

En los días posteriores, el sistema presentó decaimiento en la producción de metano, para la relación evidenciándose que tenía fallas por inhibición de los organismos metanogénicos, ya que cuando se desmontó los frascos reactores y se midió el pH en el medio, los valores oscilaban entre 4-5. Para lo cual, de acuerdo con Pramanik et al., (2019) para la conversión de ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono a gas metano, las bacterias metanogénicas necesitan de un óptimo pH que está en el rango de 6,5-7,5. Por ende, al ser organismos sensibles a variaciones bruscas del pH, terminan inhibiéndose por el bajo pH en el medio.

Buscando una explicación a la acidificación del medio, se evaluó diferentes hipótesis para conocer la causa del problema. Para ello se analizó los siguientes casos:

- ✓ Alto contenido de lípidos, que condujo a la acidificación del medio por la acumulación de ácidos grasos
- ✓ Desbalance de micro y macronutrientes en el medio

Primer caso. el primer caso se analizó desde el punto de vista, que la muestra al contener gran porcentaje de lípidos, respectos a los otros compuestos orgánicos, que como se explicó en el apartado 5.2.2, el alto contenido de lípidos conduce a una alta concentración de ácidos grasos volátiles de cadena larga, lo que se traduce en una acumulación de ácido en el medio que genera la caída del pH. La figura 6. muestra el análisis realizado en HPLC, para conocer el tipo de ácidos presentes y su concentración en el medio.

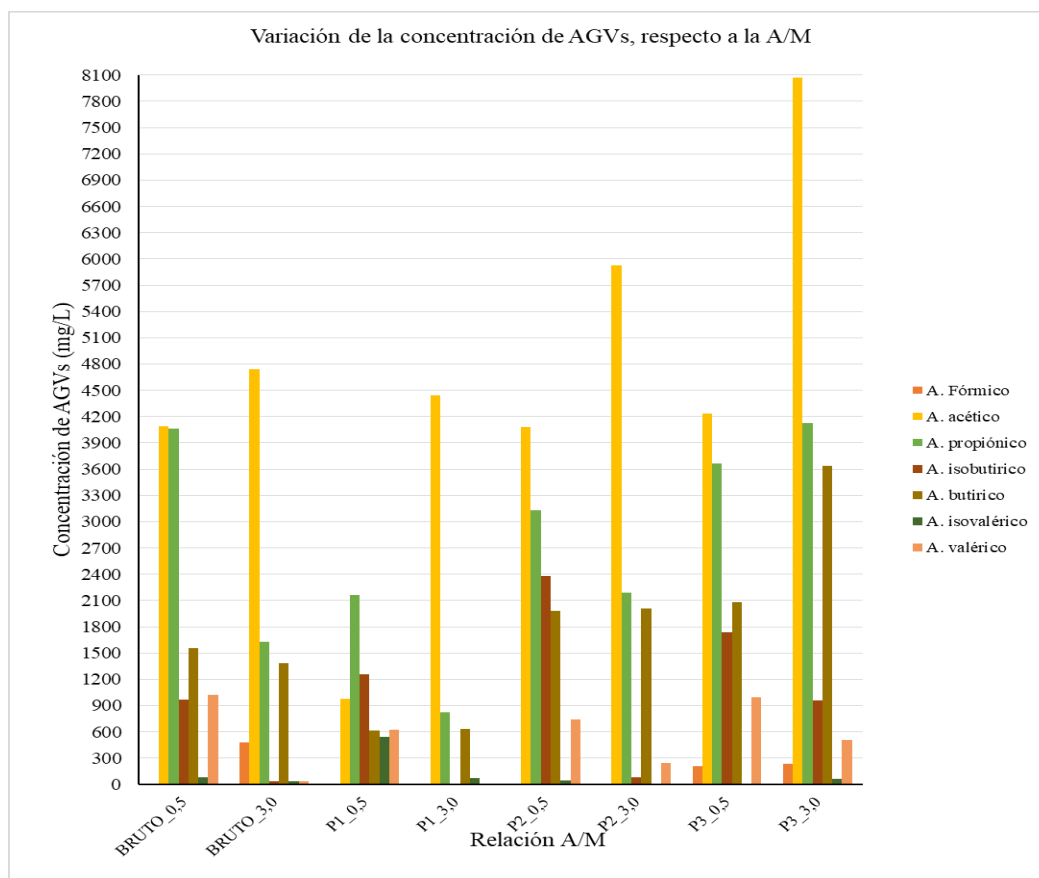


Figura 6. Variación de la concentración de AGVs, respecto a la relación A/M

Respecto a la figura 6. donde se presentan las concentraciones en mg/L de los ácidos, las concentraciones más representativas equivalen a las del ácido acético y el ácido propiónico, la del ácido acético en mayor cantidad que la del ácido propiónico. Para el ácido acético las concentraciones fueron de 1647 mg/L para (180°C); seguida de 1186 mg/L para (160°C) y 888 mg/L para (125°C), todas a relación A/M=3. La concentración más significativa del ácido propiónico fue de 825,7 mg/L a (180°C y A/M=3). Dichas concentraciones fueron influenciadas, por la temperatura usada en el pretratamiento y por la cantidad de alimento que se estaba suministrando a los microorganismos, pues una mayor cantidad de alimento, provee mayor tasa de conversión de ácidos grasos en la DA. Mediante el cálculo de la relación Bu/Ac, indicada por (Alibardi & Cossu, (2016), da una noción del comportamiento de la transformación de AGV's. La tabla 8. muestra los valores de las concentraciones para cada una de las condiciones

Tabla 8. Relación Ácido butírico -Ácido propiónico/Ácido acético

Condición	Relación	A/M=0,5	A/M=3.0
BRUTO		0,38	0,29
P1-125°C	Bu/Ac	0,62	0,14
P2-160°C		0,47	0,34
P3-180°C		0,49	0,45
BRUTO			0,99
P1-125°C	Pr/ Ac	2,20	0,18
P2-160°C		0,76	0,37
P3-180°C		0,86	0,51

Respecto a la tabla 8., la relación Bu /Ac de la que se espera obtener un valor mayor a uno, ya que a dicha condición se da normalmente la producción de biogás, ninguna de las condiciones estuvo cerca del valor, pues la concentración de ácido butírico en relación a la del ácido acético, es menor en todos los casos, lo cual explica que el sistema esté tomando una ruta diferente a la de la biometanización y sí la de producción de ácido propiónico. Para la relación Pr/Ac, con la relación A/M=0.5 la condición P2-160°C solo una posee un valor superior a 1 y las demás son cercanas para lo cual, si se esperaría ya que la producción de ácido propiónico es elevada al igual que la del ácido acético, lo que genera un desequilibrio en el sistema y causa la acidificación.

Segundo caso: respecto al desbalance de nutrientes, este factor también influyo en la no producción de biogás ya que en primer lugar el ensayo se realizó sin la adición de micronutrientes, esto con el fin de evaluar el comportamiento del sustrato al someterse a la digestión anaerobia, por ello como se evidenció anteriormente el sustrato contenía alta cantidades de sodio Na^+ y potasio K^+ , pero bajas cantidades de otros nutrientes importantes como el calcio Ca^+ , lo que genera un medio desbalanceado y poco propicio para la actividad metabólica de los microorganismos.

Por otra parte, aunque el rendimiento de metano no fue positivo para los residuos alimentares, de acuerdo con De Lemos Chernicharo, (2015) “durante la formación del ácido acético y propiónico se forma gran cantidad de hidrogeno”. Éste a su vez, tiene dos formas de ser consumido en el medio, la primera es a través de las metanogénicas que utilizan el H_2 y el CO_2 para producir metano y la segunda es a través de la formación de ácidos orgánicos tales como el propiónico y el butírico, formados mediante la reacción de hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Por lo cual, se infiere que dicha producción

de hidrogeno, está siendo consumido en la formación de ácido acético y propiónico, por ello el alto porcentaje de ácido propiónico en la mayoría de las condiciones, pues los productos de la acetanogénesis, están siendo usados para la producción de ácidos orgánicos y no de metano.

Lo anterior, explica la baja producción de biogás mostrada en la tabla 8, para cada una de las condiciones, pues las relaciones A/M=0,5 y para la A/M=3, no hubo producción significativa de biogás. Y la producción de hidrogeno, sobre todo para las relaciones A/M=3, la producción de hidrogeno para el pretratamiento 1 (125°C), pretratamiento 2 (160°C) 3 (180°C) con relación A/M=3, fue las más representativa. Lo siguiente se evidencia en las figuras 8, 9 y 10.

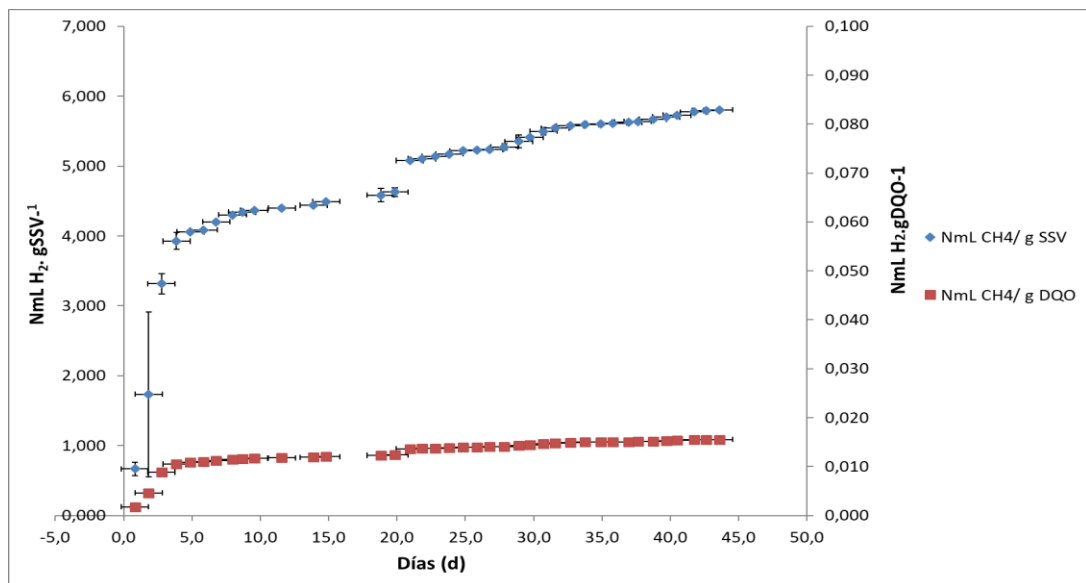


Figura 7. Producción de hidrogeno a 125°C y relación A/M=3

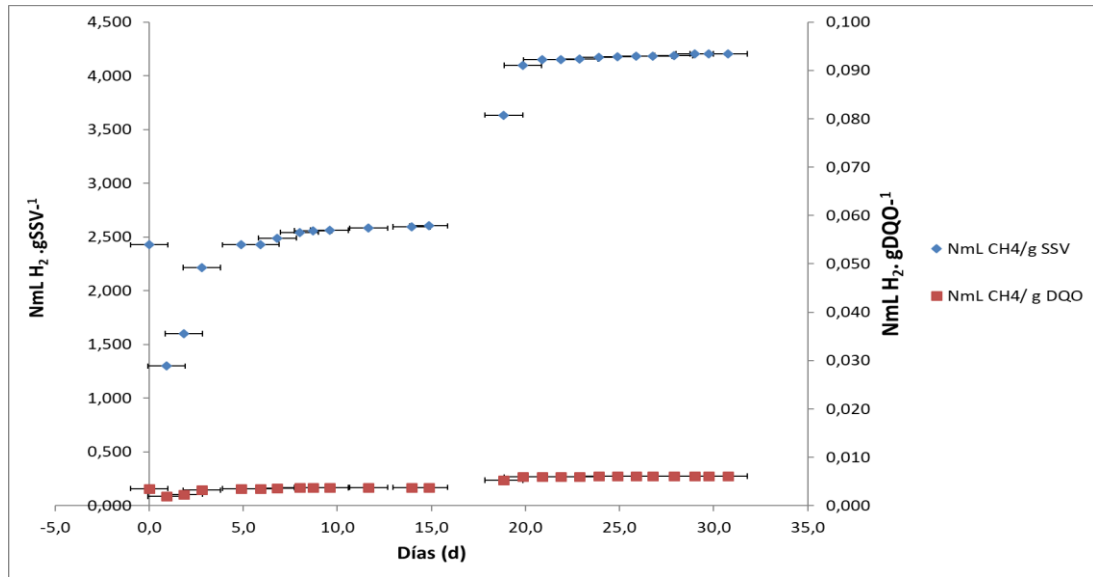


Figura 8. Producción de hidrogeno a 160°C y relación A/M=3

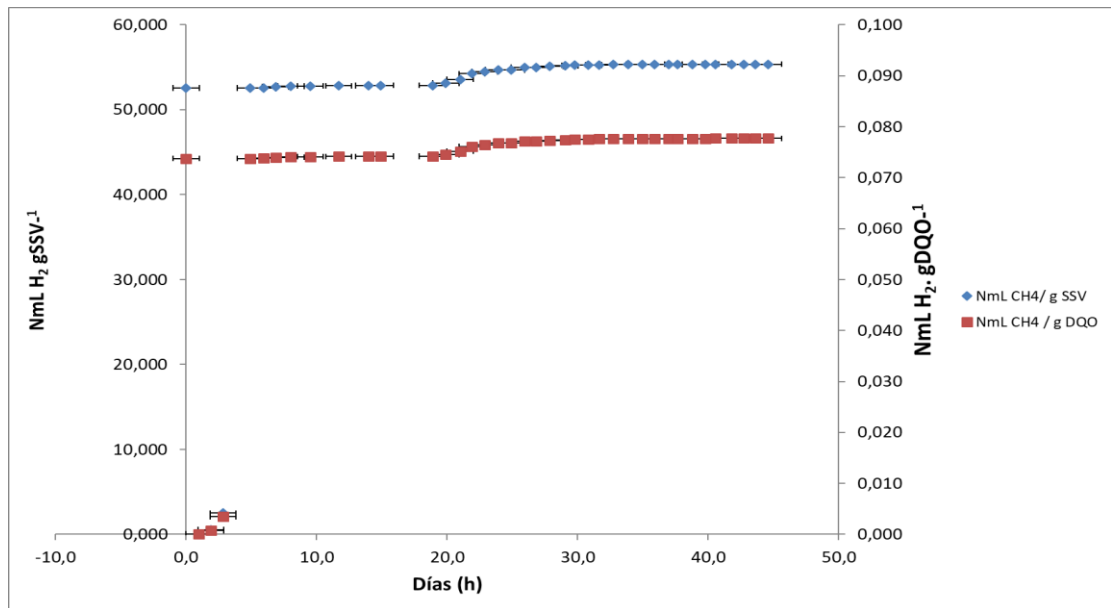


Figura 9. Producción de hidrogeno 180°C y relación A/M=3

La producción más significativa de hidrogeno en este estudio, se da a la mayor temperatura y a la mayor relación A/M, esto se debe principalmente porque los microorganismos acidogénicos, al tener gran cantidad de moléculas simples (aminoácidos, ácidos grasos y alcoholes) producto de la degradación de los lípidos, carbohidratos y proteínas mediante el pretratamiento, pueden producir altas concentraciones de ácido acético y propiónico, y consecuentemente tener una alta producción de hidrogeno.

Por el contrario, la relación $A/M=0,5$, no produce cantidades significativas de hidrogeno, ya que los microorganismos degradan tan rápidamente los ácidos grasos, que no se presenta acumulación de AGV's en el medio y por ende no genera hidrogeno.

5.5 Producción de biogás a partir de la biomasa sin lípidos

Con el fin de corroborar la no producción de biogás, se tomó la muestra resultante del test de lípidos y se sometió al mismo procedimiento, es decir al ensayo del potencial de metano. En la figura 10. se evidencia la producción de metano

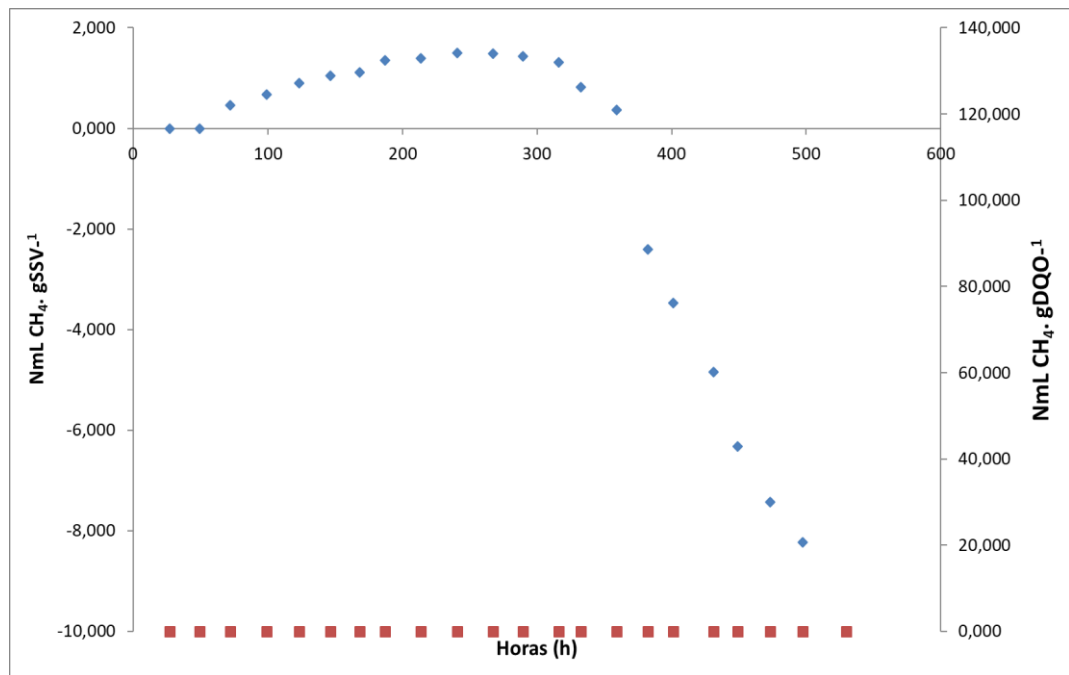


Figura 10. Producción de biogás a partir de la biomasa sin lípidos

Aquí se quería evaluar cómo era la producción de biogás con el sustrato sin lípidos, pues la alta cantidad de estos fue la causante de la acidificación.

6. CONCLUSIONES

- ✓ Los residuos alimentarios, son un excelente sustrato para la acidificación, pues sus altos contenidos de compuestos orgánicos en las proporciones adecuadas resultan positivos para la producción de hidrogeno y AGV's.
- ✓ El pretratamiento térmico aplicado a los residuos alimentarios, solubilizó gran cantidad de los principales componentes del sustrato, es decir de lípidos, proteínas y carbohidratos, lo que condujo a la acumulación de ácidos grasos volátiles, que causan acidificación en el medio y por tanto inhiben los microorganismos metanogénicos.
- ✓ El contenido proteínico del sustrato al solubilizarse con la aplicación del pretratamiento térmico, genera compuestos inhibitorios como el amoniaco NH_3 , que resulta tóxico para los microorganismos.
- ✓ El ensayo BMP, se realizó sin la adición de micro y macronutrientes, con el fin de conocer el comportamiento de sustrato en la digestión anaerobia. Sin embargo, otras de las causas de la inhibición de los microorganismos que se presentó, fue probablemente por el desbalance de nutrientes.
- ✓ Al presentarse acumulación de ácidos grasos volátiles en el medio, los microorganismos acetanogénicos pueden producir en mayor cantidad productos intermedios como el ácido acético y el ácido propiónico, y en su transformación se obtiene alta producción de H_2 , la cual también puede ser de gran aprovechamiento energético junto con los ácidos grasos volátiles.
- ✓ Los residuos alimentares, no generaron rendimiento de la producción de metano, pero si generaron dos productos (H_2 y AGVs), que pueden ser de gran importancia para el sector industrial y energético.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Para la producción de metano, a partir de los residuos alimentarios puede experimentarse un sistema en dos etapas, ya que el sustrato presentó buena acidificación, de la cuál puede tomarse el producto y emplearlo como fuente de alimento de reactores.
- ✓ Realizar la determinación de la celulosa, hemicelulosa y lignina antes y después del pretratamiento térmico, ya que por ejemplo la hemicelulosa a altas temperaturas genera compuestos inhibitorios y se debe hacer estudio de estos.

8. REFERENCIAS

- Alibardi, L., & Cossu, R. (2016). Effects of carbohydrate, protein and lipid content of organic waste on hydrogen production and fermentation products. *Waste Management*, 47, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.049>
- Andersen, L., Lamp, A., Dieckmann, C., Baetge, S., Schmidt, L. M., & Kaltschmitt, M. (2018). Biogas plants as key units of biorefinery concepts: Options and their assessment. *Journal of Biotechnology*, 283, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.041>
- Baêta, B. E. L., Cordeiro, P. H. de M., Passos, F., Gurgel, L. V. A., de Aquino, S. F., & Fdz-Polanco, F. (2017). Steam explosion pretreatment improved the biomethanization of coffee husks. *Bioresource Technology*, 245, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.110>
- Bong, C. P. C., Lim, L. Y., Lee, C. T., Klemeš, J. J., Ho, C. S., & Ho, W. S. (2018). The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – A review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1545–1558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.199>
- Centro de Estudos e Debates Estratégicos e da Consultoria Legislativa da Câmara dos, & Deputados. (2018). *PERDAS E DESPERDÍCIO DE ALIMENTOSESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO*.
- Cristóbal, J., Caldeira, C., Corrado, S., & Sala, S. (2018). Techno-economic and profitability analysis of food waste biorefineries at European level. *Bioresource Technology*, 259, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.016>
- De Lemos Chernicharo, C. A. (2015). Anaerobic Reactors. In *Water Intelligence Online* (Vol. 6). <https://doi.org/10.2166/9781780402116>
- Dieckmann, C., Lamp, A., Schmidt, L.-M., Andersen, L., Baetge, S., & Kaltschmitt, M. (2018). Von der Biogasanlage zur Bioraffinerie – Perspektiven für zukünftige Biogasanlagenkonzepte From Biogas Plant to Biorefinery—Future Outlook for Small Scale Biorefinery Concepts. *Zeitschrift Für Energiewirtschaft*, 42(3), 235–256. <https://doi.org/10.1007/s12398-018-0233-3>
- FAO. (n.d.). CHAPTER 2: METHODS OF FOOD ANALYSIS. Retrieved December 5, 2019,

from <http://www.fao.org/3/y5022e/y5022e03.htm#TopOfPage>

- FAO. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/ca6122es/ca6122es.pdf>
- Guo, H., Zhao, Y., Damgaard, A., Wang, Q., Lu, W., Wang, H., & Christensen, T. H. (2019). Material flow analysis of alternative biorefinery systems for managing Chinese food waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.010>
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012). *Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas 2012*. Retrieved from <http://www.ipea.gov.br>
- Kuczman, O., Gueri, M. V. D., De Souza, S. N. M., Schirmer, W. N., Alves, H. J., Secco, D., ... Hernandez, F. B. (2018). Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.282>
- Leipold, S., & Petit-Boix, A. (2018). The circular economy and the bio-based sector - Perspectives of European and German stakeholders. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1125–1137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.019>
- Martinez-Hernandez, E., & Samsatli, S. (2017). Biorefineries and the food, energy, water nexus — towards a whole systems approach to design and planning. *Current Opinion in Chemical Engineering*, Vol. 18, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.08.003>
- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2019). Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7(March), 100202. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., & Pramanik, B. K. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- Rao, P. V., Baral, S. S., Dey, R., & Mutnuri, S. (2010). Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2086–2094. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.031>

- Santos, T. M., Alonso, M. V., Oliet, M., Domínguez, J. C., Rigual, V., & Rodriguez, F. (2018). Effect of autohydrolysis on *Pinus radiata* wood for hemicellulose extraction. *Carbohydrate Polymers*, *194*, 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.010>
- Sheng, K., Chen, X., Pan, J., Kloss, R., Wei, Y., & Ying, Y. (2013). Effect of ammonia and nitrate on biogas production from food waste via anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*, *116*(2), 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.08.005>
- Srisowmeya, G., Chakravarthy, M., & Nandhini Devi, G. (2019). Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109587. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109587>
- Woźniak, E., & Twardowski, T. (2018, January 25). The bioeconomy in Poland within the context of the European Union. *New Biotechnology*, Vol. 40, pp. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.06.003>
- Yin, J., Wang, K., Yang, Y., Shen, D., Wang, M., & Mo, H. (2014). Improving production of volatile fatty acids from food waste fermentation by hydrothermal pretreatment. *Bioresource Technology*, *171*, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.062>
- Yirong, C., Zhang, W., Heaven, S., & Banks, C. J. (2017). Influence of ammonia in the anaerobic digestion of food waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(5), 5131–5142. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.043>
- Yong, Z., Dong, Y., Zhang, X., & Tan, T. (2015). Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*, *78*, 527–530. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.033>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>

