



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química e Ingeniería

Maestría en Ciencias de la Energía

“Evaluación de pretratamientos en el potencial bioquímico de metano en biomasa de *Ricinus communis* a partir de digestión anaerobia.”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias de la Energía

Presenta:

Ing. Diana Laura Quezada Morales

290859

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química e Ingeniería
Maestría en Ciencias de la Energía

“Evaluación de pretratamientos en el potencial bioquímico de metano en biomasa de *Ricinus communis* a partir de digestión anaerobia.”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias de la Energía

Presenta:

Diana Laura Quezada Morales

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López.

SINODALES

Dr. Miguel Angel Ramos López
Presidente

Firma

M. en B. Juan Humberto Martínez Martínez
Secretario

Firma

Dr. Francisco Javier de Moure Flores
Vocal

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza
Suplente

Firma

Dr. Jorge Gracida Rodríguez
Suplente

Firma

Dra. Silvia Lorena
Amaya Llano
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia
Loarca Piña.
Director de Investigación y
Posgrado

RESUMEN

La producción de biogás a partir de biomasa como fuente de energía tanto en la generación de calor como combustible de vehículos, se considera neutro en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono, debido a que este gas liberado durante la combustión del biogás es el mismo que la planta ha asimilado durante la fotosíntesis para crear biomasa orgánica. En el presente trabajo se corrobora el efecto de pretratamientos realizados sobre paja húmeda y seca (tallos y hojas) y bagazo (desecho de semilla) de *Ricinus communis*, se determinó el impacto de éstos sobre la eficiencia del potencial bioquímico de metano (PBM), a los cuales se les aplicaron diferentes pretratamientos (químicos y enzimáticos) además de correr un control a la par con únicamente sustrato de *Ricinus communis*, con la finalidad de determinar su efecto en el rendimiento de producción. El experimento se realizó en dos procesos de digestión anaerobia (DA), una a condiciones mesofílicas (37 °C) y otro a temperatura ambiente con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 55 días.

(**Palabras clave:** biogás, *Ricinus communis*, pretratamientos, digestión anaerobia)

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

SUMMARY

The production of biogas from biomass as power source, as well heat generation for vehicle's fuel, is considered neutral as far as the carbon dioxide goes, due to this gas released during the combustion of biogas is the same that the plant has assimilated during the photosynthesis to create organic biomass. The present work corroborates the effects of pretreatments made over humid and dry straw (stems and leaves) and oil cake (seed waste) of *Ricinus communis*, has determined the impact of this over the efficiency of biochemical methane potential (BMP) where we applied different pretreatments (chemical and enzymatic) as well running a control side by side with only *Ricinus communis* substrate, with the finality to determined the effect of performance. The experiment was realized in two processes of anaerobic digestion (AD), one in mesophilic conditions (37 °C) and the other one at room temperature with a time of hydraulic retention (THR) of 55 days.

(Key words: biogas, *Ricinus communis*, pretreatments, anaerobic digestion)

Dirección General de Bibliotecas

DEDICATORIAS

A mis padres, hermanos, hermanas, y a ti, Sergio.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi asesor el Dr. Miguel Angel Ramos López por haber depositado su confianza y dedicación para realizar este trabajo.

A mis sinodales, gracias por ser parte de este equipo, principalmente al M. en B. Juan Humberto Martínez Martínez, quien ha sido pieza fundamental en mi estructura académica, y al Dr. Francisco de Moure Flores por su apoyo.

Agradezco a mis compañeros de trabajo, por sus consejos, fortaleza y ayuda, gracias Galván, gracias Loaiza por ayudar a realizar todo lo que se me ocurría para que funcionara, fue divertido, y aunque no estuviste para este proyecto, gracias pelón, por creer en mí.

Agradezco a mi familia, porque sin ellos no hubiera llegado hasta donde estoy hoy en día, gracias por estar siempre ahí, los amo, son lo más valioso que tengo.

Gracias Sergio por tu paciencia, cariño, dedicación y por ayudarme a pensar en soluciones.

Finalmente agradezco al FOPER y CONACYT por su ayuda financiera.

INDICE

INDICE DE CUADROS	i
INDICE DE FIGURAS	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. REVISION DE LITERATURA	4
3.1 Energía.....	4
3.1.1 Energía renovable.....	5
3.2 Biocombustibles	6
3.2.1 Biocombustibles sólidos.....	6
3.2.2 Biocombustibles líquidos.....	7
3.2.3 Biocombustibles gaseosos.....	8
3.3 Sustratos para la producción de biocombustibles	9
3.3.1 Sustratos para la producción de biocombustibles líquidos	9
3.3.2 Sustratos para la producción de biocombustibles gaseosos .	10
3.4 Digestión anaerobia.....	12
3.5 Pretratamientos.....	15
3.5.1 Pretratamiento químico.....	16
3.5.2 Pretratamiento físico	20
3.5.3 Pretratamiento biológico	21
3.6 <i>Ricinus communis</i> generalidades.....	24
3.7 Biocombustibles a partir de <i>Ricinus communis</i>	25
3.7.1 Biogás a partir de <i>Ricinus communis</i>	27
IV. HIPÓTESIS	28
V. OBJETIVO GENERAL	29
VI. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
VII. METODOLOGIA.....	30
7.1 Recolección de sustratos	30
7.2 Aplicación de pretratamientos	30
7.3 Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles.....	31
7.4 Determinación de carobohidratos.....	31
7.5 Análisis de DQO.....	31
7.6 Proceso de DA.....	31
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33

8.1 Pretratamientos	33
8.2 Análisis fisicoquímicos.	36
8.2.1 Sólidos totales, volátiles y fijos.....	36
8.2.2 Determinación de carbohidratos y demanda química de oxígeno.	40
8.3 Medición de biogás	42
CONCLUSIONES	50
LITERATURA CITADA.....	51

Dirección General de Bibliotecas UAO

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del biogás crudo. _____	8
Tabla 2. Efecto del pretratamiento sobre la alteración composicional y estructural de la biomasa lignocelulósica. _____	16
Tabla 3. Pretratamientos químicos de materias primas lignocelulósicas para la producción de biogás. _____	17
Tabla 4. Pretratamiento físico de materias primas lignocelulósicas para la producción de biogás. _____	20
Tabla 5. Pretratamiento biológico de biomasa lignocelulósica para la producción de biogás. _____	22
Tabla 6. Pretratamientos realizados a <i>Ricinus communis</i> _____	31
Tabla 7. Caracterización de los sustratos en base seca _____	38
Tabla 8. Determinación de ST y SV de <i>R. communis</i> antes y después de los pretratamientos _____	40
Tabla 9. Determinación de carbohidratos y DQO en los residuos de <i>R. communis</i> con y sin pretratamientos. _____	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de CO ₂ por fuente de energía. Mundo 1990-2015 (IEA, 2021).....	4
Figura 2. Procesos y productos de <i>Ricinus communis</i> (Bateni et al., 2014).	25
Figura 3. Vista microscópica de las partes aéreas secas de <i>Ricinus communis</i> después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (<i>Trichoderma longibrachiatum.</i>); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (<i>Hypocrea jecorina</i>); e) Tratado con HCl.	35
Figura 4. Vista microscópica de las partes aéreas húmedas de <i>Ricinus communis</i> después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (<i>Trichoderma longibrachiatum</i>); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (<i>Hypocrea jecorina</i>); e) Tratado con HCl	35
Figura 5. Vista microscópica de bagazo de la semilla de <i>Ricinus communis</i> después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (<i>Trichoderma longibrachiatum</i>); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (<i>Hypocrea jecorina</i>); e) Tratado con HCl.....	36
Figura 6. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de <i>R. communis</i> seca a temperatura ambiente	44
Figura 7. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de <i>R. communis</i> seca a 37 °C	44
Figura 8. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de <i>R. communis</i> húmeda a temperatura ambiente.....	46
Figura 9. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de <i>R. communis</i> húmeda a 37 °C.....	46
Figura 10. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de bagazo de semilla a temperatura ambiente.....	48
Figura 11. Rendimiento de producción de biogás en bagazo de semilla pretratado a 37 °C.....	49

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales, aunados a la dependencia de combustibles fósiles, han llevado al desarrollo de alternativas sustentables como la generación de biocombustibles. La biomasa, es una de las energías renovables (ER) más importantes debido a que es una fuente lignocelulósica (a excepción de lodos por ejemplo), la cual contiene en su mayoría celulosa (32-45 %), hemicelulosa (19-25 %) y lignina (14-26 %), compuestos orgánicos usados para procesos químicos y de generación de energía (Kaur et al., 2018a), la hemicelulosa es un polímero formado de unidades de azúcares, de naturaleza amorfa, tiene una estructura ramificada y se degrada fácilmente a temperaturas de alrededor de 220-315 °C, la lignina es un polímero complejo reticulado que tiene unidades de fenilpropano y tiene un rango de temperatura de descomposición de 150-900 °C (Yang et al., 2007) y la celulosa es un polisacárido de cadena lineal que tiene varias unidades de D-glucosa unidas a β (1 - 4). La celulosa exhibe más resistencia térmica y su intervalo de temperatura de degradación varía de 315-400 °C (Islam et al., 2015).

Las características hemicelulósicas se pueden encontrar en especies vegetales, la planta de aceite de ricino *Ricinus communis* es un matorral perenne perteneciente a la familia Euphorbiaceae originaria de África y del sur de Europa (*Tropicos | Name - Ricinus Communis*, 2021). La planta crece en forma silvestre en muchas regiones tropicales y subtropicales y se encuentra como planta ornamental prácticamente en todo el mundo. Las semillas de ricino son una rica fuente de aceite que se puede extraer mediante molienda, ebullición, prensado o extracción con solventes (Ogunniyi, 2006). Además de las aplicaciones médicas, el aceite se ha utilizado durante mucho tiempo como combustible económico para lámparas de aceite. Debido a su alta proporción del ácido ricinoléico, es una materia prima industrial valiosa para lubricantes, pinturas, productos cosméticos y biodiesel, entre otros (Mutlu & Meier, 2010). En 2018, México sembró alrededor de 321.5 ha para la producción de aceite de ricino (*Anuario Estadístico de La Producción Agrícola*, 2021), la planta, y en particular las semillas después de la extracción de aceite, son una rica fuente de proteínas, sin embargo, el uso de residuos de la producción de aceite de ricino está limitado por la toxicidad de las semillas causada principalmente

por la proteína altamente tóxica ricina y el menos tóxico alcaloide de ricinina (Worbs et al., 2011), éstos residuos en materia húmeda según Kaur et al. (2018) contienen: celulosa 38.4 %, hemicelulosa 22.4 % y lignina 20.2 %, compuestos que pueden ser utilizados para la producción de biogás, mediante un proceso denominado digestión anaerobia (DA), con el cual se produce metano (CH_4) en ausencia de oxígeno, sin embargo, debido a la composición de la planta es necesaria la adición de pretratamientos ya sean físicos, químicos y/o biológicos, entre los que destacan conmutación, extracción, tratamiento ácido, alcalino, pretratamiento oxidativo con peróxidos, uso de hongos para síntesis de enzimas, entre otros, es importante agregar que el proceso de digestión de la biomasa requiere menos inversión de capital por unidad de costo de producción en comparación con otras fuentes de energía renovable, como la energía hidroeléctrica, solar y eólica, además de esto, el efluente del proceso de biogás suministra nutrientes que también pueden utilizarse como biofertilizante.

Este proyecto analiza el potencial bioquímico de metano (PBM) a partir de residuos (hojas, tallos y bagazo de semilla) de *Ricinus communis* proveniente de un plantío ubicado en Corregidora, Qro., México (20°31'40.1" latitud N 100°25'42.7" longitud O). Adicionalmente, se corroborará el efecto de pretratamientos, temperatura y humedad realizados sobre esta biomasa, y el impacto de éstos sobre la eficiencia de producción de biogás.

II.JUSTIFICACIÓN

La crisis energética y el cambio climático son problemas graves que afectan a todo el mundo. La utilización de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón son causantes del calentamiento global debido a las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y otros) emitidos a la atmósfera. Por tal motivo, se han buscado fuentes alternativas de energía obtenidas a partir de fuentes renovables, las cuales puedan suministrar energía sustentable y adicionalmente, reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

La biomasa, es una fuente de energía renovable que es utilizada para la producción de bioenergéticos, ejemplo de ello son los cultivos no comestibles, como los es *Ricinus communis* también conocida como higuera la cual es una planta perenne que es capaz de sobrevivir, reproducirse y establecerse en hábitats y ecosistemas naturales con poca agua, terrenos abandonados, etc., puede ser aprovechada debido a sus beneficios en la producción de biocombustibles. En México, se tienen las condiciones ambientales para establecer el cultivo de esta especie.

El territorio nacional ha gestionado tierras para el establecimiento del cultivo de *Ricinus communis*, debido al aprovechamiento del aceite de su semilla que puede ser utilizado para diversos procesos industriales, trayendo consigo el desecho orgánico (partes aéreas y bagazo) significativo de esta planta, ésta biomasa es considerada como materia lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina), la celulosa y la hemicelulosa son de fácil degradación para las bacterias metanogénicas, sin embargo, la lignina es una fibra difícil de romper, para aumentar la disponibilidad de sustrato soluble empleado para la producción de biogás, en este sentido se hace necesaria la aplicación de pretratamientos (químicos y/o biológicos) en la fase de hidrólisis que promueva la optimización de la DA, se estima que el potencial de calentamiento global por metano es 20 veces mayor que el dióxido de carbono, así en el proceso de DA reduce las emisiones naturales de metano a la atmosfera a partir de la auto descomposición de la biomasa en vertederos u otros ambientes abiertos, estos gases se capturan en biorreactores y se utiliza el metano para la producción de energía, beneficiando así al sector energético del país.

III. REVISION DE LITERATURA

3.1 Energía

Existen diversas fuentes para la producción de energía, por ejemplo, durante gran parte de la segunda mitad del siglo XX, una parte de la energía cotidiana se obtenía a partir de la energía atómica (fisión nuclear), así como de los combustibles fósiles (Domínguez Gómez, 2008). Actualmente, según IEA – International Energy Agency, (2021) el carbón suministra más de un tercio de la generación mundial de electricidad y desempeña un papel crucial en industrias como el hierro y el acero; el gas natural es el combustible fósil de más rápido crecimiento, ya que ha alcanzado una participación récord del 22 % en la demanda total de energía que contribuye a casi un tercio del crecimiento total de la demanda durante la última década, mientras que el uso de petróleo en los vehículos de combustión interna se prevé alcance su punto máximo durante la década de 2030, aumentando en promedio 0.1 mbd-1 cada año, aunado al uso de combustibles fósiles, se deriva la generación de CO₂, en reconocimiento de la importancia fundamental de comprender los problemas ambientales relacionados con la energía, la Figura 1. muestra las emisiones de CO₂ en Toneladas Métricas (MT) procedentes de la combustión del carbón, petróleo y gas natural a nivel mundial.

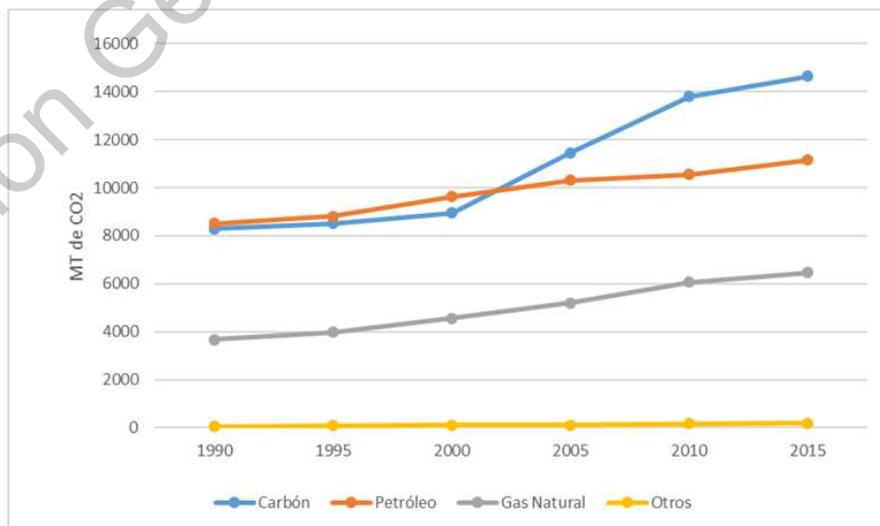


Figura 1. Emisiones de CO₂ por fuente de energía. Mundo 1990-2015 (IEA, 2021)

Sin embargo, debido a la crisis energética, se ha optado por la utilización de “energías alternas”, las cuales se describen a continuación.

3.1.1 Energía renovable.

El crecimiento en el desarrollo de las energías renovables ha tenido como resultado procesos con mayor sustentabilidad. Investigaciones arrojan resultados prometedores para las ER, considerando que en un futuro pueden llegar a solventar hasta el 90 % de la energía consumida a nivel mundial (Moriarty & Honnery, 2012). La cual se puede identificar de diversas maneras, como la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, termomarina, mareomotriz, bioenergía, entre otras. Aunque parezca constante, la energía alternativa siempre varía, debido a su constante renovación, por lo que cuenta con diversos rendimientos, lo que conlleva a tener cantidades incalculables, a pesar de que sólo se pueda utilizar un pequeño porcentaje de esta. A continuación, se describen algunos tipos de energías alternativas.

- **Energía Solar.**

De acuerdo a Sharma & Kar (2015) la energía solar se puede clasificar según su aplicación: primero, como un sistema térmico donde se utiliza la energía para calentar el sistema y, segundo, como un sistema fotovoltaico donde la energía solar se utiliza en forma de energía eléctrica.

- 1) Energía solar térmica: conversión de la luz solar en calor.

- 2) Fotovoltaico: la luz solar se convierte en electricidad.

- **Energía Eólica.**

El viento es circulación de aire en la atmósfera terrestre como consecuencia del calentamiento irregular del sol. Los sistemas de energía eólica utilizan la energía cinética del viento para la generación de energía eléctrica, para ello, se emplean aerogeneradores, sistemas que, dependiendo de la forma de giro del rotor, pueden clasificarse en dos: a) de eje horizontal (perpendicular a la velocidad relativa); y, b) de eje vertical (en la dirección de la velocidad relativa) (Dick, 2015).

- **Bioenergía**

Este tipo de energía es la obtenida de la biomasa, que es la materia

constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos, también llamado biocombustibles, los cuales se obtienen a partir de biomasa, con mayor o menor grado de procesamiento (Alberto et al., 2016). Entre estos últimos se distingue a: biocombustibles sólidos (BCS), biocombustibles líquidos (BCL) y biocombustibles gaseosos (BCG).

3.2 Biocombustibles

Los biocombustibles se refieren a la conversión de la biomasa (materia orgánica) y algunos subproductos refinados, derivados de ella, que se queman para obtener energía (calor y luz). Similar a los combustibles fósiles (Guo et al., 2015).

Además de la clasificación por estado, los biocombustibles pueden clasificarse también como de primera, segunda, tercera y cuarta generación; los de primera generación se refieren a los derivados de los recursos biológicos de primera mano, por ejemplo, azúcar, almidón, maíz, aceite vegetal o grasas animales utilizando tecnología convencional (utilización de procesos establecidos y principalmente productos alimenticios como materia prima), los biocombustibles de segunda generación también pueden definirse según el tipo de materia prima o las tecnologías utilizadas, los cuales se deriva generalmente de biomasa no alimentaria y cultivos no alimentarios como son residuos: forestales, agrícolas, cultivos energéticos no comestibles, aguas residuales, flora acuática, entre otros. Para los biocombustibles de tercera generación, la materia prima utilizada es principalmente microalgas y otros microorganismos mientras que los de cuarta generación se hace uso de bacterias genéticamente modificadas las cuales emplean anhídrido carbónico (CO₂) o alguna otra fuente de carbono para la obtención de biocombustibles (Pogaku & H. Sarbatly, 2014).

3.2.1 Biocombustibles sólidos

Los BCS son vectores energéticos obtenidos de la biomasa, con mayores o menores grados de transformación física o química, que se mantienen en estado

sólido hasta su uso final (Alberto et al., 2016). Entre ellos se encuentran:

- La leña (el bioenergético más utilizado por el hombre en la actualidad).
- Las astillas de madera.
- Los pellets de madera (el BCS de mayor comercio global actual).
- Los pellets y briquetas de residuos forestales, agrícolas y otros.
- El carbón vegetal (el reductor metalúrgico más antiguo, actualmente es un combustible muy empleado en los sectores residencial, comercial e industrial).

3.2.2 Biocombustibles líquidos.

En los países industrializados utilizaron la biomasa de la madera para fabricar varios productos químicos desde fines de los años treinta. Un ejemplo de ello es en la planta de Ford, en la que la biomasa de la madera se convirtió en ésteres para automóviles (Nelson, 1930). La biomasa se puede convertir en líquido mediante pirólisis. El reciente avance en la pirólisis permite un tiempo de calentamiento más corto, es decir, <2 s a una temperatura intermedia de 400–600 °C en condiciones sin oxígeno. El líquido producido se conoce como bio-aceite y es de color oscuro, con una densidad de energía de 20 GJ (m³)-1. Se utiliza como combustible de calderas y en especialidades químicas aromatizantes y colorantes (Pogaku & Hj. Sarbatly, 2014).

Para la producción de etanol a través de la fermentación, se emplean tres tipos de biomasa (azúcar, almidones y cultivos lignocelulósicos). Para los cultivos de azúcar, el tratamiento previo es innecesario, pero para otros cultivos, las paredes celulares deben romperse para exponer los polímeros de azúcar (Pogaku & Hj. Sarbatly, 2014). Los procesos involucrados en la producción de etanol son el tratamiento previo, la hidrólisis, la fermentación y la separación del producto por destilación.

Finalmente, el biodiesel de tipo éster se produce catalíticamente a partir de la transesterificación de metanol o etanol de triglicéridos a ésteres metílicos o etílicos. Su rendimiento y pureza dependen de la proporción de alcohol y

triglicéridos, tipo de catalizador, temperatura y pureza de triglicéridos (Pogaku & Hj. Sarbatly, 2014). Este BCL se puede producir a partir de aceites y grasas no comestibles de bajo costo. Sin embargo, la mayoría de estas fuentes son de alto contenido de ácidos grasos libres que requieren procesos de dos etapas. La etapa de tratamiento con ácido generalmente es seguida por la transesterificación de bases, ya que la última puede producir conversiones más altas de ésteres metílicos a un tiempo de reacción más corto (Pogaku & Hj. Sarbatly, 2014).

3.2.3 Biocombustibles gaseosos

Entre los BCG destacan el biogás y el llamado gas de síntesis (Syngas), el biogás es un combustible renovable alternativo al gas natural. Se genera por DA de residuos orgánicos. La composición del biogás crudo se muestra en la **Tabla 1**. Después de la purificación para eliminar el CO₂, el H₂S y otras impurezas, se utiliza biogás de calidad de tubería (ahora llamado biometano) como sustituto del gas natural.

Tabla 1. Composición del biogás crudo.

Productos gaseosos	Porcentaje
CH ₄	60-65
CO ₂	30-35
H ₂	1-5
H ₂ S	3-5

(Guo et al., 2015)

Mientras que el syngas es otro biocombustible gaseoso producido por la gasificación o pirólisis de materiales vegetales. El gas de síntesis químicamente consiste en 30–60 % de CO, 25–30 % de H₂, 5–15 % de CO₂, 0–5 % de CH₄, y porciones menores de vapor de agua, H₂S, CO, NH₃ y otros, según los tipos de materia prima y condiciones de producción (Guo et al., 2015), en el proceso, la materia prima se calienta rápidamente por encima de 700 °C en la cámara de combustión de alta temperatura de un gasificador y se quema parcialmente en presencia de flujo de aire controlado para producir gas de síntesis. En el gasificador,

la biomasa experimenta tres fases de transformación térmica: deshidratación, pirólisis y oxidación parcial. En la fase inicial de deshidratación, la biomasa secada al aire pierde rápidamente su humedad antes de que su temperatura alcance 200 °C. La pirólisis comienza a medida que aumenta la temperatura y la biomasa se convierte en carbón y vapor (Guo et al., 2015).

3.3 Sustratos para la producción de biocombustibles

Las diversas materias primas de biomasa utilizadas para producir biocombustibles se pueden agrupar en dos categorías básicas: materia prima de primera generación y segunda generación, la primera se recolecta por el contenido de azúcar, almidón y aceite y se puede convertir en biocombustibles utilizando tecnologías convencionales, la segunda se cosecha para obtener biomasa total y solo se puede convertir en biocombustibles mediante procesos técnicos avanzados (Kumar et al., 2013).

La materia prima de segunda generación se puede obtener de plantas leñosas, cultivos herbáceos, residuos agrícolas y desechos sólidos municipales. La materia prima de segunda generación se considera la forma de biomasa menos costosa y más abundante, y el contenido energético es comparable a la materia prima de primera generación (Kumar et al., 2013). Como se mencionó en la sección anterior, existen diversos tipos de biocombustibles, por consiguiente, también se cuenta con la existencia de varios tipos de sustratos para la producción de biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos, los cuales se mencionan a continuación.

3.3.1 Sustratos para la producción de biocombustibles líquidos

Entre los BCL que destacan son el bioetanol, el biobutanol y el biodiésel; la producción de etanol se basa en cultivos, utilizando sustratos como el jugo de caña de azúcar, jugo de remolacha, melaza y almidón de maíz. Dado que el costo de las materias primas puede ser tan alto como el 40 % del costo del bioetanol, los

investigadores se han concentrado en utilizar materia celulósica desde finales de los años noventa, este polímero natural y potencialmente barato y abundante se encuentra en residuos agrícolas (trigo y paja de arroz, tallos de maíz, residuos de soya, bagazo de caña de azúcar), residuos industriales (industria de pulpa y papel), residuos forestales, residuos sólidos municipales, etc. Se ha estimado que las lignocelulosas representan aproximadamente el 50% de la biomasa en el mundo y entre 10 y 50 mil millones de toneladas (Kumar et al., 2013). Los cultivos productores de biobutanol pueden utilizar una amplia variedad de carbohidratos, incluyendo lactosa, sacarosa, glucosa, fructosa, manosa, dextrina, almidón, xilosa, arabinosa e inulina derivada de materiales de alimentación como permeato de suero de leche, maíz, mijo, centeno, remolacha azucarera, trigo, avena, y sulfito residual (un subproducto de la industria del papel que contiene glucosa, xilosa y arabinosa). La xilosa y la arabinosa son azúcares de pentosa y están presentes en sustratos celulósicos. La capacidad de usar todos estos carbohidratos hace posible fermentar casi todos los sustratos agrícolas, como la biomasa leñosa, los residuos agrícolas, los materiales de desecho y los cultivos energéticos, incluidos el césped y el miscanthus (Kumar et al., 2013), mientras que los sustratos potenciales para la producción de biodiesel son: aceites vegetales; incluyen aceites comestibles, aceites no comestibles, aceites comestibles de desecho (aceite vegetal usado), aceite de girasol, aceite de oliva y aceite de soya. Los aceites vegetales son naturalmente insolubles en agua y son sustancias hidrófobas. Los aceites no comestibles y obtenidos de árboles que se incluyen son jatropha (*Jatropha curcas*), semilla de caucho (*Hevea brasiliensis*), ricino (*Ricinus communis* L.), mango de mar (*Cerbera odollam* o *Cerbera manghas*), árbol del paraíso (*Simarouba glauca*) e Indio árbol de haya (*Pongamia pinnata*), entre otros (Kumar et al., 2013). Las grasas animales consideradas más comúnmente son las derivadas de las aves de corral, el cerdo y de res (Sharma & Kar, 2015). Los aceites de algas, hongos y bacterias también se han investigado para la producción de biodiesel (Schenk et al., 2008).

3.3.2 Sustratos para la producción de biocombustibles gaseosos

Existen diversos BCG, sin embargo, este apartado se concentra en el biohidrógeno, gas de síntesis, y por supuesto, biogás.

El hidrógeno se puede producir a partir de biomasa (desechos agrícolas, desechos municipales, algas, etc.), electrólisis usando energía renovable (solar, eólica, etc.), combustible fósil (carbón, petróleo, gas natural, etc.) y energía nuclear (J. Wang & Yin, 2017). El biohidrógeno se puede producir también de desechos orgánicos sólidos, como los desechos ricos en carbohidratos (manzanas, zanahorias, raíces de alcachofa, hojuelas de maíz, avena, papas y hortalizas), los residuos ricos en proteínas (pastel de leche, carne de pollo, estiércol de vaca con paja, residuos de pescado y residuos de carne de restaurantes), residuos agroindustriales (incluidos los residuos de alimentos de restaurantes, bagazo de semilla de colza, bagazo de semilla de girasol, orujo de uva, cáscaras de fruta (naranja y plátano y mazorca de maíz), residuos agrícolas (hojas y tallos de alcachofa, tallos y hojas de caña, tallos de maíz, paja de arroz y tallos de sorgo), efluente de aceite de palma, aguas residuales de destilería y papeles de desecho (Singh & Rathore, 2017).

Para la producción de gas de síntesis una de las biomásas más disponibles es la madera, pero es un material valioso debido a sus aplicaciones actuales como material de construcción. Sin embargo, los residuos de madera (aserrín, corteza y piezas deformes) tienen muy poco valor comercial y, por lo tanto, son los principales candidatos para ser utilizados como materia prima de gasificación. Otros tipos de residuos industriales (agrícolas, forestales, etc.) también podrían usarse como materia prima: cáscaras de arroz, café o coco, bagazo de caña de azúcar y hierba. El cultivo de energía, como el álamo, la caña de azúcar y el sorgo dulce, que consiste en el cultivo de biomasa específicamente para combustibles, también es otra posibilidad interesante en la producción de gas de síntesis (Fang, 2013).

Por su parte, el biogás tiene una amplia gama de sustratos, incluidos desechos agrícolas, desperdicios de alimentos, desperdicios industriales y aguas residuales, así como cultivos. Se han llevado a cabo diversas investigaciones para la producción de biogás, por ejemplo, Kolesárová et al. (2011) revisa la posibilidad de utilizar los subproductos de la producción de biodiesel como sustratos para la digestión anaerobia y la producción de biogás, el estudio determina que alrededor

del 12 % de las grasas (o incluso el 20 % en el caso de instalaciones de procesamiento pequeñas) pueden permanecer en el bagazo de la semilla cuando se emplea un método de prensado simple. El segundo prensado, a veces acompañado de extracción de vapor de agua, puede reducir el contenido de grasas a aproximadamente el 8 %. Si se realiza la extracción con hexano, se puede generar harina oleaginosa con un contenido de grasas de aproximadamente 1 a 3 %, también se menciona lo difícil de descomponer la hemicelulosa y la lignina, que forman los caparzones en el proceso de producción de biogás y la adición de pretratamientos para mejorar la productividad y el rendimiento de metano.

El contenido de sólidos volátiles (SV), la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), la relación C/N (Carbono/Nitrógeno) y la presencia de sustancias inhibitorias se encuentran entre los parámetros de materia prima más importantes que deben considerarse (Ghavinati & Tabatabaei, 2018), además, los recursos de biomasa susceptibles de producción de biogás pueden agruparse en categorías de acuerdo a diversos criterios. Según el rango taxonómico de su origen, pueden ser vegetales y animales. Según el sector que los genera, pueden ser agrícolas (estiércol y lodos, subproductos vegetales y residuos, cultivos energéticos), industriales (residuos orgánicos, subproductos y residuos de agroindustrias, industrias alimentarias, industrias de forrajes y cervecerías, aguas residuales con carga orgánica y lodos de procesos industriales, subproductos orgánicos de la producción de biocombustibles y biorrefinerías, etc.), municipales (residuos domésticos separados por fuentes, residuos de aguas residuales, residuos sólidos municipales y residuos de alimentos) (Abbasi et al., 2012).

3.4 Digestión anaerobia.

La DA como tecnología ha existido durante mucho tiempo, por ejemplo, en el mundo industrializado, se ha empleado principalmente para tratar aguas residuales y lodos, así como residuos húmedos (Al Seadi et al., 2013).

Este proceso implica la fermentación microbiana de biomasa en ausencia de oxígeno durante aproximadamente 2–8 semanas (dependiendo del sustrato) en

reactores anaerobios, los más utilizados son: UASB (reactor anaerobio de flujo ascendente), EGSB (reactor anaerobio granular de lecho expandido), ASBR (reactor anaerobio por lotes en serie), CSTR (reactor de tanque continuamente agitado), RFP (reactor de flujo pistón) los cuales favorecen las condiciones donde es posible recuperar los gases. Un proceso similar que involucra residuos sólidos municipales que, además de los componentes celulósicos, puede contener sustancias poliméricas, grasas, proteínas, etc. Este es el proceso comercialmente más utilizado y viable según los métodos bioquímicos de conversión de biomasa. El producto de la DA tiene un valor aproximado de calentamiento de $26 \text{ MJ (m}^3\text{)}^{-1}$ (Baskar et al., 2012) y conduce a la descomposición de compuestos biodegradables complejos donde Abbasi et al, (2012) lo muestra en un proceso de 4 etapas que se mencionan a continuación:

1. Las macromoléculas de proteínas grandes, las grasas y los polímeros de carbohidratos (como la celulosa y el almidón) se descomponen a través de hidrólisis de aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares.

2. Estos productos luego se fermentan durante la acidogénesis para formar ácidos grasos volátiles, principalmente ácido láctico, propiónico, butírico y valérico.

3. En la acetogénesis, las bacterias consumen estos productos de fermentación y generan ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.

4. Los organismos metanogénicos consumen acetato, hidrógeno y parte del dióxido de carbono para producir metano. Los metanógenos utilizan tres vías bioquímicas para lograr esto: (a) vía acetotrófica ($4\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{CH}_4$), (b) vía hidrogenotrófica ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$), y (c) vía metilotrófica ($4\text{CH}_3\text{OH} + 6\text{H}_2 \rightarrow 3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$).

La DA puede ser afectada por factores que pueden inhibir el proceso, dentro de los cuales destacan la relación C/N, que se considera óptima en un rango de 20 a 30. Si la relación C/N es demasiado alta, los metanógenos consumen rápidamente el nitrógeno para cumplir con sus requerimientos de proteínas y ya no está disponible para reaccionar sobre el contenido de carbono sobrante en el material, como resultado, la producción de biogás baja, sin embargo, si la relación C/N es demasiado baja, el nitrógeno se libera y se acumula en forma de amoníaco provocando aumento de pH del material, si el valor del pH aumenta más de 8.5,

comienza a ejercer un efecto tóxico sobre las bacterias metanogénicas (Da Costa Gomez, 2013). Otro factor que se debe de cuidar en el proceso es la dilución, el agua debe agregarse, si es necesario a la materia prima para generar una suspensión que no sea ni demasiado gruesa ni demasiado delgada. Si un material se diluye demasiado, las partículas sólidas pueden asentarse en el digestor y no degradarse adecuadamente. Si la suspensión es demasiado espesa, puede ser difícil agitarla y puede impedir el flujo de gas a la parte superior del digestor. Diferentes sistemas pueden manejar diferentes niveles de densidad de lodos, generalmente en el rango de 10 a 25 % de sólidos, otro causante de afectaciones en la DA es el pH, para que la producción de biogás óptima pueda ser alcanzada, el valor debe permanecer entre 7.2 y 8.2, dentro del consorcio metanógeno, pueden existir variedad de bacterias, las diferentes especies de bacterias metanogénicas funcionan óptimamente en tres rangos de temperatura diferentes: 50–65, 20–50 y <10 °C, en cuestión se les conoce como termofílicas, mesofílicas y psicofílicas respectivamente, de 10-20 °C se consideran psicofílicas obligadas. fuera de estos estrechos rangos de temperatura, los consorcios microbianos no pueden sobrevivir (Murphy & Thamsiroj, 2013).

Un factor más que influye directamente en la degradación del material orgánico dentro del digestor es el "tiempo de retención", que es la duración durante la cual el material orgánico (sustrato) y los microorganismos ("sólidos") deben permanecer juntos en un digestor para lograr el grado deseado de degradación. Acortar el tiempo de retención del sustrato (TRS) requerido para lograr este objetivo en un reactor anaeróbico, hace más eficiente el reactor, para lograrlo, se deben tener en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el TRS, entre otros factores que influyen en el proceso de DA son la toxicidad, la agitación del reactor, bacterias patogénicas y los residuos sólidos (Abbasi et al., 2012), éstos últimos cuando poseen cierta cantidad de lignina es necesaria la adición de pretratamiento, los cuales se describen a continuación.

3.5 Pretratamientos

Para que un pretratamiento pueda ser considerado eficaz debe de presentar ciertas características, a continuación, se enlistan las de interés primordial para un adecuado proceso de digestibilidad (Zheng et al., 2014):

- Pérdidas mínimas de material o sustrato.
- Elevar la eficiencia de hidrólisis.
- Liberar la mayor cantidad posible de azúcares.
- Requerir de poca energía durante el proceso o en su caso ser reutilizable.
- Costos bajos de inversión.

Es importante mencionar que los pretratamientos en ocasiones presentan desventajas en el proceso de producción de biocombustibles. En la Tabla 2 se muestran diversos pretratamientos a los que materiales lignocelulósicos pueden someterse para mejorar la degradación y de ese modo, aumentar el potencial de producción de metano (Zheng et al., 2014), estos tratamientos pueden ser físicos, químicos y biológicos.

Tabla 2. Efecto del pretratamiento sobre la alteración composicional y estructural de la biomasa lignocelulósica.

Tratamiento	Incremento del área de superficie accesible	Descristalización de celulosa	Solubilización de hemicelulosa	Solubilización de lignina	Alteración de la estructura de la lignina.	Formación de furfural/hidroximetilfurfural (HMF)
Mecánica	■	■				
Irradiación	■	□	□			□
Explosión de vapor	■		■	□	■	■
Agua caliente líquida	■	ND	■	□	□	□
Explosión de vapor catalizada	■		■	■/□	■/□	■
Ácido	■		■	□	■	■
Alcalino	■		□	■/□	■	□
Oxidativo	■	ND		■/□	■	□
Líquidos iónicos	■	■	□			
Ácido térmico	■	ND	■			■
Térmica alcalina	■	ND	□	■/□	■	□
Térmico oxidativo	■	ND	□	■/□	■	□
Explosión de fibra de amoníaco	■	■	□	■	■	□
Pretratamiento biológico	■	ND	■	■	■	

■ = efecto mayor, □ = efecto menor, ND = no determinado, y blanco = sin efecto
(Zheng et al., 2014)

3.5.1 Pretratamiento químico.

Se refiere al uso de productos químicos, como ácidos, bases y líquidos iónicos, para alterar las características físicas y químicas de la biomasa lignocelulósica (Zheng et al., 2014). Entre las tres categorías de pretratamiento discutidas, el pretratamiento químico ha recibido el mayor interés de investigación. Aunque se han estudiado muchos métodos de pretratamiento químico para la producción de etanol celulósico, solo algunos de ellos se han aplicado a la producción de biogás en los procesos de DA. Los tratamientos químicos estudiados

para la producción de biogás se resumen en la Tabla 3 y se analizan a continuación.

Tabla 3. Pretratamientos químicos de materias primas lignocelulósicas para la producción de biogás.

Pretratamiento químico	Materia Prima	Condiciones de pretratamiento	Resultados
Alcalino	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de trigo, paja de arroz, rastrojo de maíz, hojas de remolacha azucarera, maíz, heno ensilado, bagazo de caña de azúcar, colza, tallos de girasol, orujo de uva. Residuos forestales: hojas caídas Madera dura: abedul Madera blanda: abeto y pino Hierba: zacate, borraza y hierba de trigo Residuos sólidos municipales: fracción orgánica de residuos sólidos municipales y pupa de papel/lodo 	<ul style="list-style-type: none"> Productos químicos: NaOH, Ca(OH)₂, CaO, KOH y NH₃.H₂O Carga química= 1-10%(g/g materia seca) Temperatura= -15-170°C Tiempo= de 1 h a 10 días. 	Efecto positivo en la mayoría de los casos con un aumento del 3.2% a 2.3 veces en el rendimiento de metano. Los efectos negativos también ocurrieron en muy pocos casos. En general, es más efectivo en la biomasa que contiene más lignina.
Ácido	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: pasteles de aceite de girasol, residuos de invernadero, bagazo de caña de azúcar, residuos del proceso de extracción a base de hierbas, tallos de girasol, fibra de coco, semillas de colza, harinas de girasol, pajitas y helechos Hierba: heno Residuos sólidos municipales: papel de periódico. 	<ul style="list-style-type: none"> Productos químicos: H₂SO₄, HCl, HNO₃, H₃PO₄, CH₃COOH y C₄H₄O₄. Carga química= 1-4% (g/g materia seca) (el ácido orgánico podría ser mucho mayor, por ejemplo, ácido acético= 35-80%) Temperatura= desde temperatura ambiente hasta 170°C Tiempo= de unos minutos a horas, incluso 30 días 	Efecto positivo en la mayoría de los casos con un aumento del 20-200% en el rendimiento de metano. También se produjeron efectos negativos en muy pocos casos (p. Ej., H ₂ SO ₄ al 2% en colza).
Catalizado explosión de vapor	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: biofibra digerida, cáñamo, paja de trigo. Residuos sólidos municipales: Residuos de tubo de papel. 	<ul style="list-style-type: none"> Productos químicos: H₂SO₄, SO₂, H₃PO₄, NaOH, con y sin H₂O₂ Carga química= 0.5-4% (g/g materia seca) Temperatura= de 5 minutos a 1 hora 	18-107% de mejora de rendimiento de metano.

Oxidación húmeda	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de trigo, desechos biológicos digeridos, tallos de maíz, paja de centeno de invierno, paja de colza y semilla de haba Madera dura: sauce Hierba: Miscanto Residuos sólidos municipales: residuos de periódicos y residuos de jardín 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura = 180- 220°C Presión de oxígeno = 0-1.2 MPa (se podría agregar H₂O₂) Tiempo = unos minutos 	34-136% de mejora del rendimiento de metano
Pretratamiento oxidativo con peróxidos	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de arroz y tallos de girasol, sorgo, sida hermaphrodita Residuos sólidos municipales: fracción orgánica de residuos sólidos municipales y residuos de tubos de papel Hierba: Miscanto 	<ul style="list-style-type: none"> Los productos químicos incluyen principalmente H₂O₂ con dosis 1-4% (g/g de materia seca), también se usó NaOH (0-2%) sobre H₂O₂ para una mejora adicional del rendimiento de metano. Tiempo= de unos minutos a 7 días Temperatura = 25- 220 °C. 	33-120% de mejora en el rendimiento de metano. También se observaron efectos negativos

(Zheng et al., 2014)

El pretratamiento alcalino utiliza bases, como NaOH, Ca (OH)₂, KOH y NH₃H₂O, para eliminar la lignina, la hemicelulosa y/o la celulosa, lo que hace que la biomasa lignocelulósica sea más degradable para los microbios y las enzimas. El tratamiento alcalino fue usado por Talha et al. (2016) obtuvieron una reducción máxima de lignina del 86.3 % y un rendimiento acumulado de metano de 195.8 mL·gVS⁻¹, sometiendo bagazo de caña de azúcar a pretratamiento con NaOH a 37±1 °C, por otra parte Chandra et al. (2012) sometieron la paja de trigo a pretratamiento con NaOH obteniendo como resultado una mejora de 87.5 % en la producción de biogás y un 111.6 % más de producción de metano en comparación con la paja de trigo sin tratar, el pretratamiento alcalino asimismo fue usado para tratar hojas de árboles por Liew et al. (2011), los resultados arrojan un aumento de la producción de metano del 21.5% obteniendo 81.8 L·kgVS⁻¹ con un (TRH) de 30 días.

Se cree que la función del pretratamiento alcalino es la saponificación y la escisión de los enlaces lignina-carbohidrato. Al eliminar los enlaces cruzados, el pretratamiento alcalino conduce a un aumento de la porosidad y el área de superficie

interna, hinchazón estructural, una disminución en el grado de polimerización y cristalinidad, interrupción de la estructura de la lignina y una ruptura de los enlaces entre la lignina y otros polímeros. La efectividad del pretratamiento alcalino se asocia con el contenido de lignina de los materiales de biomasa (Zheng et al., 2014).

Por otra parte, el pretratamiento ácido puede realizarse usando ácido concentrado (30-70 %) y a baja temperatura (40 °C) o bajo ácido diluido (<0.1 %) y a alta temperatura (>230 °C). Los ácidos inorgánicos y orgánicos, incluido el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el ácido nítrico, el ácido fosfórico, el ácido acético y el ácido maleico, se han utilizado para pretratamientos con ácido diluido, siendo H₂SO₄ el más comúnmente utilizado, en este sentido Gomez-Tovar et al. (2012) realizaron tratamiento con HCl en paja de avena y encontraron que el 85.5 % del contenido de hemicelulosa en la paja de avena se hidrolizó aunque también ocurrió hidrolizado en la celulosa, mientras que Badshah et al. (2012) encontraron un aumento de metano del 18 % en el bagazo de caña tratado con ácido sulfúrico en comparación con el no tratado. Aunque el ácido concentrado es altamente efectivo en la hidrólisis de celulosa, es extremadamente tóxico, corrosivo y peligroso, y requiere materiales costosos, como materiales no metálicos especializados o aleaciones, para la construcción del reactor. Además, el ácido debe recuperarse después del tratamiento con biomasa por razones económicas, ya que es un proceso que requiere mucha energía y costos. Por lo tanto, se prefiere el ácido diluido sobre el ácido concentrado para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica, y se han llevado a cabo estudios exhaustivos que lo convierten en uno de los métodos de pretratamiento químico más comúnmente aplicados. El pretratamiento con ácido diluido hidroliza principalmente hasta el 100% de la hemicelulosa en sus azúcares componentes (por ejemplo, xilosa, arabinosa y galactosa), dependiendo de las condiciones de pretratamiento. También puede interrumpir la lignina en un alto grado, pero no es eficaz para disolver la lignina en la mayoría de los casos. El resultado principal del pretratamiento con ácido diluido es aumentar la susceptibilidad de la celulosa a la degradación microbiana y la hidrólisis enzimática (Zheng et al., 2014).

3.5.2 Pretratamiento físico

Se refiere a métodos que no utilizan productos químicos o microorganismos durante los procesos de pretratamiento. Para este trabajo, el agua, ya sea en estado líquido o gaseoso, no se considera una sustancia química. Las técnicas de pretratamiento físico desarrolladas anteriormente incluyen trituración (por ejemplo, molienda), explosión de vapor (autohidrólisis), pretratamiento de agua caliente líquida (hidrotermólisis), extrusión e irradiación (ultrasonido y microondas). Como se muestra en la Tabla 4, el pretratamiento físico generalmente puede mejorar el rendimiento de metano de la biomasa lignocelulósica, como los residuos agrícolas.

Tabla 4. Pretratamiento físico de materias primas lignocelulósicas para la producción de biogás.

Pretratamiento físico	Materia prima	Condiciones de pretratamiento	Resultados
Transformación en polvo	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de trigo, paja de arroz, avena, trébol, bagazo, fibra de coco, cáñamo, cáscaras de plátano, hojas de coliflor y biofibras digeridas Residuos forestales: hojas de mirabilis Césped: volcado de hierba y heno de hierba Residuos sólidos municipales: fracción orgánica de residuos sólidos municipales 	Tamaño de partícula: 0.003-30 mm	Hasta un 30% de mejora en el rendimiento de metano. Ocasionalmente, el tamaño reducido disminuyó la producción de biogás.
Explosión de Vapor	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de trigo, tallos de maíz, paja de maíz, desechos cítricos, pulpa de papa, paja de colza y biofibras digeridas Madera dura: cedro japonés, sauce y abedul Hierba: espadaña, miscanto y algas Residuos sólidos municipales: Fracción orgánica de residuos sólidos municipales y 	160-260 ° C, 0.7-4.8 MPa, y de segundos a unos pocos minutos	Efecto positivo de hasta un 40% de aumento en el rendimiento de biogás. También ocurrió de cero o efecto negativo

	residuos de tubos de papel		
	<ul style="list-style-type: none"> • Madera blanda: bambú 		
Agua caliente	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos agrícolas: paja de trigo, paja de arroz, racimos de frutas vacías de palma aceitera, tallos de girasol y bagazo de caña de azúcar • Hierba: Miscanthus y hierba híbrida. • Residuos sólidos municipales: Fracción orgánica de residuos sólidos municipales y residuos de tubos de papel 	100-230°C (0.1-2.8 MPa) durante unos minutos a horas	7-220% de aumento en el rendimiento de metano
Extrusión	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos agrícolas: paja de cebada, maíz y fracción sólida de estiércol • Hierba: <i>Lolium multiflorum</i> y heno granulado • Residuos sólidos municipales: Fracción orgánica de residuos sólidos municipales 	0.45-3.5 MPa durante unos minutos (por ejemplo, 4-12 min) y temperatura típica de 60-90°C	8-70% de mejora en el rendimiento de metano
Irradiación	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos agrícolas: paja de trigo, paja de cebada, trigo de primavera, trigo de invierno, paja de avena y tallos de arroz • Hierba: pasto varilla y hierba híbrida • Residuos sólidos municipales: Fracción orgánica de residuos sólidos municipales 	115-300°C durante unos minutos a horas	Mejora de 4-28% del rendimiento de metano. No se encontraron efectos adversos. La combinación con ácidos o álcalis podría lograr una mayor mejora del rendimiento del biogás.

(Zheng et al., 2014)

3.5.3 Pretratamiento biológico

El pretratamiento biológico para mejorar la producción de biogás en la digestión anaeróbica se ha centrado principalmente en el pretratamiento de hongos, el pretratamiento por consorcio microbiano y el pretratamiento enzimático (Zheng et al., 2014). Los pretratamientos biológicos se llevan a cabo con microorganismos capaces de hidrolizar eficientemente la hemicelulosa y remover la lignina. Estos

microorganismos reductores son anaerobios facultativos o estrictos, y crecen en la superficie de la pared celular de las plantas, donde son capaces de degradar compuestos complejos a compuestos simples (Rabemanolontsoa & Saka, 2016).

La Tabla 5 es un resumen de los métodos de pretratamiento biológico utilizados para mejorar la producción de biogás de biomasa lignocelulósica.

Tabla 5. Pretratamiento biológico de biomasa lignocelulósica para la producción de biogás.

Pretratamiento Biológico	Microbios y enzimas	Materias primas	Condiciones de Pretratamiento	Resultados
Hongos	Hongos de podredumbre blanca, marrón y suave (por ejemplo, <i>Ceriporiopsis subvermispora</i> , <i>Auricularia auricula-judae</i> , <i>Trichoderma reesei</i>) y hongos basidiomicetos (por ejemplo, <i>Ischnoderma resinosum</i> y <i>Fomitella fraxinea</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: hojas de castaño dulce/heno y residuos de decorticaciones de hojas de sisal Madera dura: astillas de madera de cedro japonés 	28-37 ° C durante 12 días a 8 semanas; con autoclave o sin ella de materia prima antes de la inoculación; condición aeróbica	15% a 5 veces el aumento del rendimiento de metano
Consortio microbiano	Agentes microbianos complejos que contienen levadura y bacterias celulolíticas, todos tratados térmicamente, <i>Clostridium thermocellum</i> y una mezcla de hongos y microbios de compostaje.	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: paja de maíz, tallos de maíz, tallos de algodón, residuos de yuca y biofibras de estiércol 	20-55 ° C durante 12 h-20 días; en autoclave o sin ella de materia prima antes de la inoculación; Condición aeróbica	Mejora de rendimiento de metano en 25-96.63%

Enzimático	Lacasa; pectinasa; mezcla de celulasa y hemicelulasas; mezcla de celulasa, hemicelulasa y β -glucosidasa; y <i>Trichoderma complejo enzimático</i>	<ul style="list-style-type: none"> Residuos agrícolas: pulpa de remolacha azucarera, lúpulo gastado y biofibras de estiércol Residuos sólidos municipales: lodos de pulpa y papel Hierba: Pasto de trigo 	37°C durante 4-24 h; Sin esterilización antes de cargar enzimas; Condición aeróbica (si el pretratamiento se separa de la DA) o anaeróbica (si las enzimas se cargaron directamente en los reactores de la DA)	0-34% de aumento en el rendimiento de metano
Ensilado	Mezcla de bacterias homo y heterofermentativas; mezcla de bacterias y enzimas de ácido láctico (α -amilasa, celulasa, hemicelulasa y pentosanasa); y mezcla de bacterias, levaduras y hongos de ácido láctico hetero y fermentativos homo y fermentativos	Residuos agrícolas: maíz	Temperatura ambiente durante 7 semanas; Condición anaeróbica; en frascos esterilizados	Aumento del 15% en el rendimiento de metano, pero también se encontró un efecto negativo

(Zheng et al., 2014)

El manejo de enzimas ha sido muy usado en hidrolización de la materia orgánica para la producción de biogás tal es el caso de Ziemiński et al. (2012) quienes obtuvieron 13% más biogás en el pretratamiento con enzimas en pulpa de remolacha azucarera en comparación con la no tratada; en otro estudio realizado por Gomez-Tovar et al. (2012), haciendo uso de hidrolizado de enzimas, obtuvieron 96.8 % de solubilización de hemicelulosa y el 42.2 % de lignina en la paja de avena, por su parte Schroyen et al. (2014) al utilizar enzimas lacasa, peroxidasa de manganeso y peroxidasa versátil a sustrato de mazorca de maíz demostraron que el uso de enzima lacasa aumentó la producción de metano 25 % y la peroxidasa 17 %.

La deslignificación biológica es un enfoque rentable, requiere poca energía, es respetuoso con el medio ambiente, baja formación de materiales tóxicos como furfural, hidroximetilfurfural, etc. Se ha demostrado el enfoque biológico utilizando

microorganismos directos y enzimas extraídas de microorganismos. El pretratamiento biológico podría explotarse como un pretratamiento predeterminado de primer paso en combinación con otro método de pretratamiento o por sí solo si la biomasa tiene un bajo contenido de lignina (Agbor et al., 2011).

3.6 *Ricinus communis* generalidades

La planta de ricino, *Ricinus communis* L. es una especie de planta de la familia Euphorbiaceae, que contiene una gran cantidad de plantas principalmente nativas de los trópicos. Pertenece a un género monotípico *Ricinus*. El nombre *Ricinus* es una palabra latina para garrapata. La planta se llama probablemente porque su semilla tiene marcas y un vertedero al final que se asemejan a ciertas garrapatas. El nombre común de aceite de ricino proviene de sus usos como reemplazo de una base de perfume hecha de glándulas secas de castor (Bolaji et al., 2014). La taxonomía del ricino es la que se muestra a continuación:

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
Superdivisión	Spermatophyta
División de la planta de floración	Magnoliophyta
Subclase	Rosidae
Orden	Euphorbiales
Familia	Euphorbiaceae
Género	<i>Ricinus</i>
Especie	<i>R. communis</i> L.

(Bolaji et al., 2014)

El ricino originalmente era un arbusto que puede crecer por encima de los 10 m de altura. En la actualidad, las variedades cultivadas crecen hasta una altura de 60-120 cm en 1 año, y varios metros en cultivos perennes. El ricino crece en los trópicos húmedos hasta las zonas secas subtropicales (precipitación óptima 750–1000 mm, temperatura 15–38 °C). La cosecha de aceite de ricino es bastante compleja. Cuando se cosecha a mano, el racimo maduro se corta selectivamente y luego se retiran las cápsulas. Debido a las diferentes etapas de madurez de las semillas, se necesitan hasta cinco cosechas separadas. En la cosecha mecánica,

normalmente se utilizan cosechadoras modificadas, y estas separan parcialmente las cápsulas inmaduras. En este caso, las plantas deben estar sin hojas, lo que puede requerir el uso de defoliantes (Scholz & da Silva, 2008).

3.7 Biocombustibles a partir de *Ricinus communis*

La planta de ricino en su conjunto puede ser aprovechada para la producción de diversos biocombustibles, estos se pueden obtener a partir del aceite y de los residuos de la planta, es decir, el tallo, las hojas y el bagazo. En la Figura 2, se observan los diferentes biocombustibles que se consiguen con las diferentes partes de la planta.

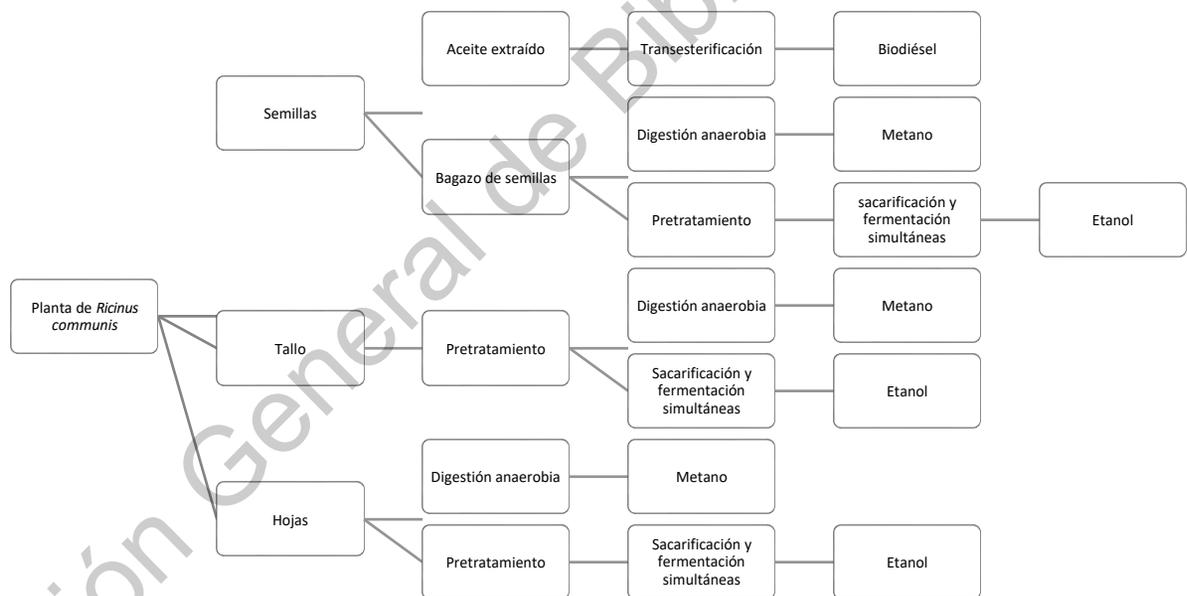


Figura 2. Procesos y productos de *Ricinus communis* (Bateni et al., 2014).

El biodiesel es una mezcla de monoalquil ésteres de aceites vegetales o grasas animales, que se pueden producir mediante una reacción de transesterificación (Kolesárová et al., 2011).

La producción de biodiesel a partir de aceite de ricino obtenido de las semillas técnicamente se lleva a cabo mediante transesterificación catalizada con alcohol, muy probablemente metanol. Un catalizador generalmente está involucrado para

mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento. Se pueden usar álcalis (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, carbonatos y sus correspondientes alcóxidos de sodio y potasio), ácidos (ácido sulfúrico, ácido sulfónico o ácido clorhídrico) o enzimas para catalizar la reacción (Kolesárová et al., 2011).

El etanol y el biogás son otros biocombustibles que se producen industrialmente a partir de recursos de biomasa fácilmente degradables, es decir, azúcares y materiales con almidón (Sambusiti et al., 2013).

Debido a los recursos limitados de los materiales a base de almidón y azúcar, los materiales lignocelulósicos como *Ricinus communis*, un recurso económico, se han considerado como materia prima alternativa para la producción de etanol y biogás. Una hidrólisis ácida o enzimática seguida de una etapa de fermentación, generalmente de *Saccharomyces cerevisiae*, se usa para la producción de etanol. Aunque los materiales lignocelulósicos tienen una cantidad considerable de carbohidratos, que pueden convertirse en biogás y bioetanol, su estructura recalcitrante es un obstáculo en su conversión directa a los productos deseados (Sambusiti et al., 2013). Por lo tanto, un proceso de pretratamiento es una etapa fundamental necesaria para reducir la recalcitrancia de los materiales, es decir, reducir la cristalinidad de la celulosa, aumentar el área de superficie accesible y eliminar la lignina y las hemicelulosas (Adl et al., 2012; Shafiei et al., 2013). Después de la etapa de pretratamiento, los materiales pretratados se someten a digestión anaeróbica para la producción de biogás o se hidrolizan para convertir los carbohidratos de las lignocelulosas en azúcares fermentables que los microorganismos pueden utilizar para la producción de etanol. Se han desarrollado varios métodos de pretratamiento para alterar la estructura de los materiales lignocelulósicos, incluidos los métodos físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos. El pretratamiento alcalino con hidróxido de sodio es uno de los procesos químicos más efectivos, que puede mejorar el rendimiento de producción de etanol a partir de las lignocelulosas (Salehian & Karimi, 2013).

En cuanto a producción de biocombustible gaseoso a partir de *Ricinus communis* se hablará en la siguiente sección.

3.7.1 Biogás a partir de *Ricinus communis*

Aunque la extracción de aceite de ricino para la producción de biodiesel es muy estudiada, poco se ha investigado de la producción de biogás a partir de los desechos de esta planta, su estructura y la cantidad de desechos generados llevan al estudio del PBM, Alves et al. (2010) realizaron diversos experimentos para aprovechar el bagazo de la semilla y someterla a DA, dichos experimentos incluyeron la adición de agua solamente, agua y estiércol de vaca y agua con estiércol porcino en digestores por lotes con un TRH de 56 días, los resultados obtenidos indicaron que la adición de agua y estiércol de vaca alcanzaron la mayor producción de biogás logrando 1 L L^{-1} de sustrato, en otro estudio realizado por Bateni et al. (2014) se involucraron todos los desechos de la planta (tallo, hoja y bagazo de semilla), a estos se les aplicó tratamiento alcalino con NaOH al 8 % p/v a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 60 minutos con un TRH de 45 d, los resultados arrojaron aumento en la producción de metano del tallo de ricino del 44 %; sin embargo, no pudo mejorar el rendimiento de producción del bagazo y las hojas de ricino. Adicionalmente, el bagazo de semilla sin tratar tuvo el mayor rendimiento de producción de metano de 252.1 mL gVS^{-1} .

IV. HIPÓTESIS

La aplicación de pretratamientos con celulasas a partes aéreas y bagazo de *Ricinus communis*, aumenta su biodegradabilidad dentro de biorreactores, incrementando así la disponibilidad de sustrato que será consumido por las bacterias metanogénicas en el proceso de digestión anaerobia, alcanzando así un aumento en el potencial bioquímico de metano de por lo menos el 15%.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

V. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de metano a partir de desechos (paja y bagazo de semilla) de *Ricinus communis* pretratados con dos cocteles de celulasa obtenidas de *Hipocrea jecorina* y *Trichoderma longibrachiatum* en la obtención de biogás.

VI. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente las partes aéreas y bagazo de semilla de *Ricinus communis*.
- Evaluar el efecto de pretratamientos con dos cocteles de celulasa para la obtención de biogás a partir de paja y bagazo de *Ricinus communis*.

VII. METODOLOGIA

7.1 Recolección de sustratos

Se trabajó con dos sustratos diferentes, partes aéreas de *Ricinus communis* (hojas y tallos), denominada paja y el bagazo de semilla resultante de la extracción de aceite; para la recolección de la paja, el material vegetal se obtuvo de plantío ubicado en Corregidora, Qro., México (20°31'40.1" latitud N 100°25'42.7" longitud O), la planta se utilizó en estado húmedo (recién cortada) sustrato que se denominó como partes aéreas húmedas de *R. communis* (PAHRc) y en estado seco (deshidratada por efectos naturales) nombrado como partes aéreas secas de *R. communis* (PASRc); para el bagazo de la semilla de *R. communis* (BSRc), se usó el recién desechado de la extracción del aceite y en estado seco, el secado del material se realizó sometiendo las muestras en un deshidratador solar hasta llegar a obtener el 15% de humedad. Los sustratos posteriormente se cortaron y trituraron en una licuadora doméstica y posteriormente se tamizaron para dejar un tamaño de partícula de hasta 2 mm.

7.2 Aplicación de pretratamientos

Debido a la composición del sustrato se sometieron a cuatro tratamientos distintos; dos tratamientos enzimáticos y dos tratamientos químicos. Los tratamientos a realizados, el tiempo dedicado para cada uno de ellos, la temperatura a la que se mantuvieron y el pH ajustado antes de la DA para los desechos de ricino se presentan en la Tabla 6, además, las capturas de estos pretratamientos se realizaron en un microscopio biológico binocular de la marca VELAB VE-B0, empleando el objetivo 40X retráctil; ya que el objetivo principal de los pretratamientos fue convertir la estructura compleja del sustrato en una forma más simple para mejorar la velocidad de reacción y reducir el tiempo de hidrólisis, así mismo, evaluar los cambios en la estructura microscópica de los residuos después del pretratamiento.

Tabla 6. Pretratamientos realizados a *Ricinus communis*

MUESTRA	PRETRATAMIENTO [h]	pH	TEMPERATURA
<i>Ricinus communis</i> sin tratar	0	7	Ambiente
<i>Ricinus communis</i> tratado con enzima celobiohidrolasa obtenida de <i>Hipocrea jecorina</i> (al 0.1 % p/p)	18	7	60 °C
<i>Ricinus communis</i> tratado con enzima celulasa obtenida de <i>Trichoderma longibrachiaum</i> (al 0.5 % p)	18	7	60 °C
<i>Ricinus communis</i> tratado con NaOH (al 4 % p/v)	24	7	Ambiente
<i>Ricinus communis</i> tratado con HCl (al 1.5 % p/v)	2	7	80 °C

7.3 Determinación de sólidos totales y sólidos volátiles

Para la determinación de ST y SV en la paja y el bagazo de semilla, las muestras se caracterizaron de acuerdo con métodos APHA (Telliard, 2001).

7.4 Determinación de carbohidratos

Esta determinación se realizó mediante el método ácido sulfúrico y fenol (Dubois et al., 1956), donde se pueden cuantificar carbohidratos, para fines de la investigación se midieron únicamente hexosas por medio de espectrofotometría UV.

7.5 Análisis de DQO

Se determinaron midiendo la cantidad de oxidante consumido por el método fotométrico de Boyles (Demand, 2005).

7.6 Proceso de DA

Los procesos de digestión se llevaron a cabo con 4 % de ST. Los

experimentos se realizaron en reactores tipo batch con un volumen total de 120 mL. Se evaluaron cuatro diferentes pretratamientos: 2 enzimáticos celobiohidrolasa extraído de *Hipocrea jerorina* y celulasa extraída de *Trichoderma longibrachiaum*, 1 alcalino (NaOH), y 1 ácido (HCl), que se aplicaron dentro de la etapa de hidrólisis a los sustratos, además se dejó un control (sustrato sin pretratamiento). Se trabajó con un volumen de 80 mL, y se inoculó con excreta vacuna al 20 % de su volumen de trabajo. Todos los biorreactores fueron sellados herméticamente. Los experimentos se llevaron a cabo a 37 °C, y a temperatura ambiente, además, se realizó medición de biogás diariamente a través de desplazamiento volumétrico por un TRH de 55 días.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Pretratamientos

Para la evaluación del efecto de los pretratamientos se observó el cambio en las estructuras físicas de los sustratos de las partes aéreas de *R. communis*, los cuales se muestran en las Figuras 1 (PAHRc) y 2 (PASRc), se observó para ambos una estructura poco degradada (Figuras 2a y 3a), sin embargo, al término de los pretratamientos en los sustratos (Figuras 2b-e y 3b-e), se pudo ver la degradación de sus estructuras morfológicas. En comparación con Momayez et al. (2019) quienes observaron por SEM que al realizar pretratamientos con temperatura y el producto enzimático Cellic CTec2 a la paja de trigo, la severidad de las condiciones del pretratamiento convirtieron la estructura compacta de la paja en una estructura más porosa, con lo cual, lograron que el sustrato sea más accesible para las bacterias en el siguiente paso de la digestión. Por otra parte, los pretratamientos con NaOH a dos temperaturas diferentes realizados por Bateni & Karimi, (2016) a los residuos vegetales de *Eureca sativa* mostraron que el pretratamiento a 0 °C produjo picaduras profundas entre los compartimientos del sustrato, mientras que el pretratamiento a 100 °C mostró lúmenes vacíos, los cuales representaron que las capas de cobertura del sustrato se destruyeron después del pretratamiento aumentando así la porosidad de los residuos con respecto al sin tratar. Un estudio enfocado a la paja de trigo aplicando pretratamiento con HCl elaborado por Chen et al. (2020), reveló que las fibras de la paja de trigo empapadas durante 2 h en agua desionizada estaban completas y ordenadas, sin embargo, después de 2 h de pretratamiento ácido, la estructura de la fibra se volvió desordenada e incluso desfragmentada, por lo que este estudio señala que el pretratamiento pudo romper los enlaces de hidrógeno y covalentes entre las unidades de lignocelulosa. Estos resultados concuerdan con la descripción de que los pretratamientos ayudan a acelerar la destrucción de los compuestos vegetales como se mencionó anteriormente para esta investigación.

Por otra parte, para los pretratamientos elaborados con bagazo de la semilla de *R. communis*, en la estructura del sustrato dejaron residuos de aceite, lo cual

intervino de manera desfavorable y no permitió observar cambios morfológicos entre el control y los pretratamientos (Figura 4a-e), esto fue debido a que la extracción del aceite se realizó mediante presión hidráulica y a 95 °C. En comparación con la investigación de Sánchez-Cantú et al. (2018) quienes efectuaron pretratamiento con coctel enzimático extraído del hongo *Pleurotus djamor* para la obtención de bioetanol a partir del bagazo de la semilla de *R. communis*, encontraron que la muestra presentó dos microestructuras diferentes: la primera, fue la mayor parte de la muestra, fue identificada como la contribución de la testa al bagazo de la semilla y la segunda microestructura presentó una forma esférica que correspondió a los cuerpos de lípidos y proteínas, así mismo, Bateni et al. (2017) realizaron pretratamiento alcalino con NaOH a 0 y 100 °C al bagazo de la semilla de *Eruca sativa*, en donde encontraron que el bagazo sin tratar no afectó significativamente la porosidad del sustrato, sin embargo, el pretratamiento a baja temperatura dio como resultado algunos poros dispersos en la estructura mientras que el tratamiento a alta temperatura condujo a una estructura aglomerada en el bagazo pretratado, que se debe principalmente a la gelatinización del almidón a 100 °C y su expulsión a la superficie formando un recubrimiento, por lo tanto, el pretratamiento alcalino del bagazo de la semilla de *E. sativa* no tuvo éxito en el aumento de la porosidad. Por otra parte, Monlau et al. (2013) realizaron tratamiento con ácido a 170 °C al bagazo de la semilla de girasol, determinando así que el pretratamiento fue eficaz para eliminar las hemicelulosas, además de la modificación estructural del bagazo durante el pretratamiento.

Bateni & Karimi. (2016) sugieren que la presencia de aceite en los pretratamientos puede ser una fuente de nutrientes adicional para las bacterias metanogénicas en la DA.

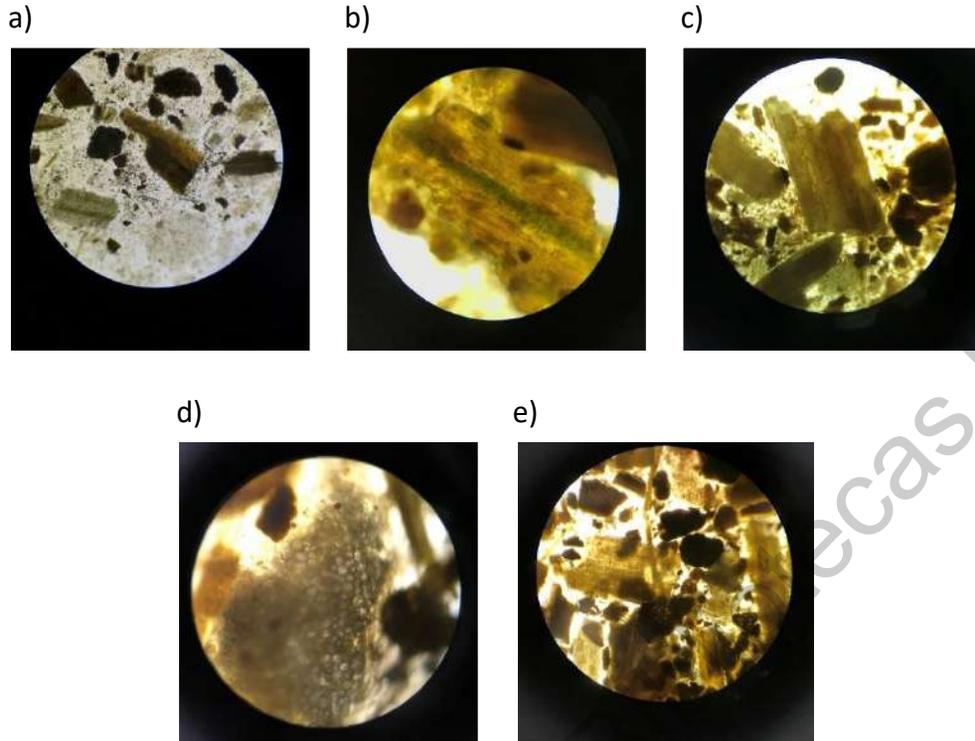


Figura 3. Vista microscópica de las partes aéreas secas de *Ricinus communis* después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (*Trichoderma longibrachiatum*.); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (*Hypocrea jecorina*); e) Tratado con HCl.

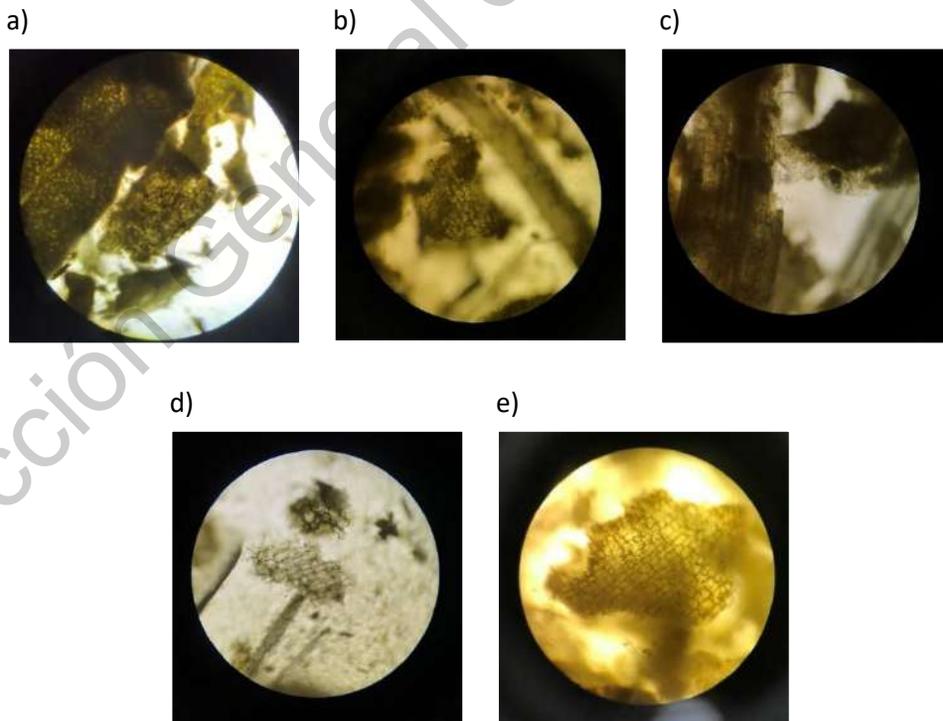


Figura 4. Vista microscópica de las partes aéreas húmedas de *Ricinus communis* después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (*Trichoderma longibrachiatum*.); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (*Hypocrea jecorina*); e) Tratado con HCl

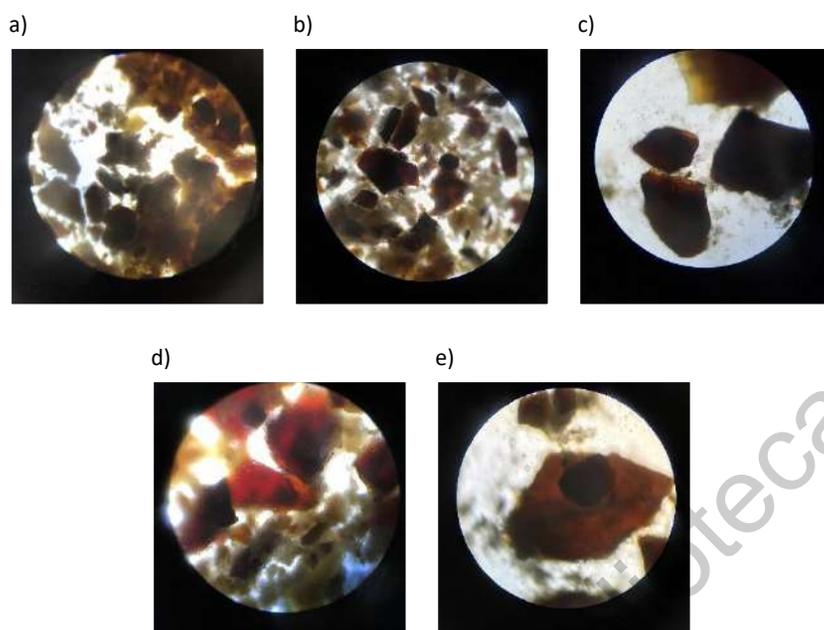


Figura 5. Vista microscópica de bagazo de la semilla de *Ricinus communis* después de los pretratamientos. a) Sin tratar; b) Tratado con NaOH; c) Tratado con enzima celulasa (*Trichoderma longibrachiatum*); d) Tratado con enzima celobiohidrolasa (*Hypocrea jecorina*); e) Tratado con HCl

8.2 Análisis fisicoquímicos.

8.2.1 Sólidos totales, volátiles y fijos.

Los análisis fueron determinados antes (**Tabla 7**) y después (**Tabla 8**) de la realización de los pretratamientos de los diferentes sustratos, en la **Tabla 7** se observa que el porcentaje de humedad para las PAHRc fue de 73.47%, mientras que para el BSRc y las PASRc, presentaron una disminución en el contenido de humedad del 94 y 83.63 % respecto a PAHRc. En cuanto al contenido de ST en PAHRc fue de 26.53 %, 3.6 veces menos que el determinado en BSRc y 2.9 veces menor que el obtenido de las PASRc. Los SF en las muestras de PAHRc fueron de 3.44 %, teniendo una disminución de 7.1 y 4.6 veces para el BSRc y las PASRc, mientras que los SV para las PAHRc son de 23.1 %, para los sustratos BSRc y PASRc aumentan 3 y 3.2 veces con respecto a PAHRc.

Kaur et al. (2018b) reportaron 11.14 % de humedad para los residuos (hojas

y tallos) de *R. communis* previamente deshidratados. Estos mismos autores reportaron 88.86 y 74.3 % de ST y SV, respectivamente, los cuales fueron similares a los obtenidos en esta investigación, además de 9.16 % de SF; Kalogiannis et al. (2016) obtuvieron 4.4 % de SF en partes aéreas de *R. communis* deshidratadas, estos valores fueron 1.7 y 3.6 veces menor, respectivamente, al reportado en este estudio.

Para el bagazo de la semilla, Hilioti et al. (2017) observaron 5.6 % de humedad; mientras que Alves et al. (2010) reportaron 9.97 %, el primer valor es cercano al 4.42 % reportado en este escrito, la diferencia puede deberse al método de extracción del aceite ya que para esta investigación se realizó por extracción mecánica, mientras que los autores lo realizaron por soxhlet; datos cercanos a bagazos de semillas de plantas oleaginosas pertenecientes a la familia Euphorbiaceae también se han llevado a cabo y son similares a los determinados en esta investigación, un ejemplo es el 7.5 % de humedad obtenido por Chandra et al. (2012) sobre el bagazo de la semilla de *Jatropha*; o el 8.3% alcanzado por Sinbuathong et al. (2011) con el mismo sustrato, la mayoría de esos estudios solo se realizan sobre el bagazo de la semilla (y no sobre las partes aéreas de la planta) debido a que es la materia prima para la extracción del aceite. En relación a ST, SF y SV para el BSRc, Hilioti et al. (2017) lograron 92.74 % y 5.62 %, respectivamente, no determinaron SV, valores que disminuyen en 3 y 77 % en comparación con los mostrados en la **Tabla 7**; Chandra et al. (2012) y Raheman & Mondal (2012) determinaron SV para bagazo de semilla de *Jatropha*, donde reportaron 17.3 y 72.7 %, los autores no reportan la procedencia del bagazo, por ende, es difícil determinar la diferencia y la semejanza al primer y segundo valores reportados en este estudio.

Tabla 7. Caracterización de los sustratos en base seca

Muestra	Humedad (%)	ST (%)	SV (%)	SF (%)
PASRc	9.82±0.42	90.18±0.41	74.38±0.59	15.81±0.18
PAHRc	73.47±0.36	26.53±0.36	23.1±0.27	3.44±0.09
BSRc	4.42±0.85	95.58±0.71	71.12±1.22	24.45±0.52

Los datos son el promedio de 2 repeticiones.

La **Tabla 8** señala los gramos por litro de ST y SV contenidos en las muestras con y sin pretratamientos, en ella se observó que las PASRc con pretratamiento aumentaron su contenido de ST en un 42 %, 197 %, 800 % y 345 % con los tratamientos de PASRc NaOH, PASRc celulasa, PASRc celobiohidrolasa y PASRc HCl respectivamente con relación al control; también hubo aumento en la concentración de SV respecto al control 42 %, 235 %, 938 % y 288 % para los mismos tratamientos. Para las PAHRc, dos de los 4 pretratamientos aumentaron sus concentraciones de ST, estos fueron los pretratados con NaOH y celulasa con un 66 % y 251 % respectivamente, mientras que el tratado con celobiohidrolasa disminuyó en 60 % y el tratado con HCl no presentó cambio, por otra parte, en relación a su contenido de SV, dos pretratamientos mostraron aumento y dos disminución en sus concentraciones, el tratado con NaOH y celulasa, aumentaron en 73 y 264 % respectivamente, mientras que los tratados con celobiohidrolasa y HCl disminuyeron sus concentraciones en 65 y 35 %. En cuanto al BSRc sólo un pretratamiento (celulasa) presentó una disminución del 25% en la concentración de ST, mientras que los tratados con NaOH, celobiohidrolasa y HCl aumentaron en 418 %, 50 % y 112.5 % respectivamente, esta misma tendencia de disminución y aumento presentaron las concentraciones de SV, ya que la concentración para el pretratado con celulasa disminuyó en un 29 %, sin embargo, el bagazo pretratado con NaOH, celobiohidrolasa y HCl aumentaron con 426 %, 48 % y 16 %.

Şenol et al. (2021) evaluaron las concentraciones de ST y SV para pretratamientos ácido sulfúrico al 5% (v/v) y alcalino a 3N con NaOH, a la pulpa de

la remolacha azucarera, en donde observaron disminuciones en las concentraciones con relación a la remolacha sin tratar, encontrando disminuciones de 25% y 22.73% de ST y SV para el tratamiento alcalino, mientras que para la remolacha tratada con H_2SO_4 obtuvieron disminuciones de 22 % y 14.78 % de ST y SV respectivamente, por lo que en comparación con esta investigación, el tratamiento ácido a las PAHRc presentó disminuciones en los SV y estabilidad en los ST, sin embargo, si se logró aumentar las concentraciones de ST y SV para el tratamiento alcalino, lo que corrobora que es conveniente deshidratar las partes aéreas de *R. communis* antes de pretratarlas, debido al aumento en la concentración de ST y SV para los tratamientos ácido y alcalino, los aumentos en las concentraciones de ST y SV con pretratamientos, de acuerdo a Moreno (2011) denotan que pueden ser convertidos a metano.

El estudio realizado por Passos et al, (2016) donde aplicaron un tratamiento enzimático con celulasas a una comunidad mixta de microalgas para la producción de biogás, encontraron que la concentración de SV aumentó en 5324.68 % para las algas pretratadas con enzimas, el aumento en las concentraciones de SV realizando pretratamiento con celulasa para las partes aéreas de *R. communis* tanto húmedas como secas también se vio reflejado, sin embargo, estos aumentos no fueron tan notorios, debido a que en el sustrato en el que mayor aumento se tuvo fue en las PASRc con 938 %. Para el bagazo de la semilla con el mismo pretratamiento presentó menor contenido de SV por litro, el motivo del efecto minoritario del pretratamiento sobre el bagazo pudo ser la degradación de la hemicelulosa, que en su mayoría contiene xilano y no deja que el pretratamiento actúe sobre el sustrato (Bateni et al., 2014).

Tabla 8. Determinación de ST y SV de *R. communis* antes y después de los pretratamientos

Muestra	ST (g L ⁻¹)	SV (g L ⁻¹)
PASRc sin tratar	31	26
PASRc tratado con NaOH	44	37
PASRc tratado con Celulasa	92	87
PASRc tratado con Celobiohidrolasa	280	270
PASRc tratado con HCl	138	101
PAHRc sin tratar	96	91
PAHRc tratado con NaOH	159	157
PAHRc tratado con Celulasa	337	331
PAHRc tratado con Celobiohidrolasa	38	32
PAHRc tratado con HCl	96	59
Bagazo sin tratar	32	31
BSRc tratado con NaOH	166	163
BSRc tratado con celulasa	24	22
BSRc tratado con celobiohidrolasa	48	46
BSRc tratado con HCl	68	36

8.2.2 Determinación de carbohidratos y demanda química de oxígeno.

En esta sección se analiza las concentraciones de hexosas y DQO contenidas en cada uno de los sustratos con sus diferentes pretratamientos, en la **Tabla 9** se puede apreciar que al realizar pretratamientos a las PAHRc éstos aumentaron la concentración de hexosas en 1.09, 2.87, 1.23 y 1.60 veces más que el control para el tratamiento alcalino, el tratado con enzima celulasa, el tratado con enzima celobiohidrolasa y el tratamiento ácido respectivamente, de igual manera se obtuvieron aumentos en las concentraciones de la DQO para los mismos pretratamientos en 1.78, 3.27, 1.42 y 4.21 veces, para las PASRc el pretratamiento con enzima celobiohidrolasa tuvo un efecto contrario, ya que disminuyó la concentración de carbohidratos 2.08 veces con respecto al control, sin embargo, para los demás pretratamientos se obtuvieron aumentos de 0.88, 1.59 y 1.75

veces para el tratado con NaOH, celulasa y HCl respectivamente, en cuanto a la DQO para este sustrato, las concentraciones cambiaron en cada uno de los pretratamientos con relación al control aumentando 2.14 veces con NaOH, 2.22 veces con celulasa, 5.81 veces con celobiohidrolasa y 6.43 veces con HCl, en cuanto al sustrato de BSRc, la concentración de hexosas disminuyó 2.24 veces con el tratamiento alcalino, sin embargo, para los tratamientos con celulasa, celobiohidrolasa y HCl, aumentó en 2.22, 1.59 y 2.60 veces respectivamente, esta misma tendencia mostraron las concentraciones de DQO debido a que aumentó 1.96 veces el tratamiento alcalino, 3.05 veces el tratado con celulasa, 1.50 veces con celobiohidrolasa y 1.87 veces el tratamiento ácido.

Wang et al. (2015) realizaron pretratamientos químicos (alcalino y ácido) a la paja de arroz para la obtención de biogás, observando que la conversión de carbohidratos con NaOH al 2 % (p/p) aumentó 7.9 veces, mientras que para el tratamiento con HCl al 1 % (p/v), la mejora fue 4 veces mayor, este mismo estudio, evaluó los efectos de estos pretratamientos en la DQO, encontrando similitudes, ya que el tratamiento alcalino aumentó su concentración 4.79 veces, mientras que el tratamiento ácido lo hizo 4.65 veces, estas mejoras en las concentraciones de carbohidratos fueron superiores a las obtenidas en esta investigación, ya que las partes aéreas con los mismos pretratamientos, el máximo incremento fue de 1.75 veces para las PASRc con HCl, por otra parte la comparación de DQO con este estudio, mostró mayores concentraciones, ya que el incremento fue de 6.43 veces para el mismo sustrato con el mismo pretratamiento, el aumento en las concentraciones de DQO es un parámetro que indica el material químicamente oxidable total en la muestra, y por lo tanto el contenido de energía de una materia prima, además la solución ácida indicó que la celulosa se degradó más rápido que con los otros pretratamientos (Hendriks & Zeeman, 2009; Ryckebosch et al., 2011), otro estudio realizado por Momayez et al, (2018) a la paja de arroz con pretratamiento hidrotérmico (celulasa a 190°C) mejoró su concentración de carbohidratos 2 veces en relación al control, aumento similar a los reportados en esta investigación, ya que para las PAHRc fue de 2.87 veces y para las PASRc fue 1.59 veces mayor.

Uçkun Kiran & Liu, (2015) realizaron pretratamiento con coctel crudo de enzimas obtenido de desechos de una panadería, el cual aplicaron a los residuos de comida de una cafetería para la obtención de etanol, en esta publicación, la concentración de carbohidratos incrementó con la aplicación de pretratamiento 1.07 veces, por otra parte,

Zhang et al, (2020) también evaluaron pretratamiento enzimático (amilasa, glucomilasa y proteasa) al mismo sustrato para la producción de biogás, ellos obtuvieron aumento en la DQO de 1.44 veces con pretratamiento que sin él, estos valores tanto el de carbohidratos, como el de la DQO, son cercanos a los aumentos obtenidos para las partes aéreas de *R. communis* y el BSRc pretratadas con celobiohidrolasa. También se han realizado pretratamientos químicos a los granos gastados de la industria cervecera para la producción de bioetanol, tal es el caso del estudio realizado por Wilkinson et al, (2014) donde se evaluó la concentración de carbohidratos en tratamientos alcalino y ácido, encontrando de esta manera, aumento de 2.43 veces para el sustrato tratado con 3 % de NaOH y 2.82 veces para el tratado con 1 % de HCl, en este sentido, el BSRc con los mismos pretratamientos, tuvo discrepancia para el tratamiento alcalino, ya que hubo disminución en la concentración, sin embargo, el tratamiento ácido obtuvo aumento de 2.60 veces, valor similar al reportado para los granos gastados.

Tabla 9. Determinación de carbohidratos y DQO en los residuos de *R. communis* con y sin pretratamientos.

Pretratamientos	PAHRc hexosas [mg L ⁻¹]	PAHRc DQO [mg L ⁻¹]	PASRc hexosas totales [mg L ⁻¹]	PASRc DQO [mg L ⁻¹]	BSRc hexosas totales [mg L ⁻¹]	BSRc DQO [mg L ⁻¹]
Sin tratar	447.44	1247.19	514.41	749.39	238.19	918.59
NaOH	487.21	2216.76	451.11	1607.27	106.31	1800.94
Celulasa	1286.03	4074.76	815.57	1661.68	528.28	2800.23
Celobiohidrolasa	549.29	1770.82	246.75	4355.32	379.16	1376.69
HCl	716.73	5245.66	898.54	4815.98	618.16	1720.37

8.3 Medición de biogás

El rendimiento de producción de biogás a partir de PASRc con diferentes pretratamientos tanto a temperatura ambiente (**Figura 6**), como a temperatura controlada (**Figura 7**), se aprecia un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 55 días, al realizar la comparación de ambas figuras, se observó que la temperatura fue un factor importante en el rendimiento de biogás, debido a que en cada uno de los pretratamientos con el mismo sustrato, incrementó con la temperatura, los reactores expuestos al ambiente generaron $166.56 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, mientras que a

temperatura controlada fue de $227.02 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, para el tratamiento alcalino, de $249.87 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, aumentó a $353.51 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, mientras que para el tratado con enzima celulasa, el aumento fue más del doble pasando de $51.91 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ a $114.09 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, por otra parte en el pretratamiento con celobiohidrolasa, a temperatura ambiente se obtuvo $14.95 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, pero a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ alcanzó $108.49 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, siendo este el tratamiento con mayor incremento porcentual, el tratamiento ácido también mostró mejora con temperatura, pasando de $66.06 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ a $111.47 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, a partir de estos datos, se observó que el tratamiento alcalino en ambas temperaturas, produjo mayor cantidad de biogás, comparado con los pretratamientos enzimáticos.

Otra planta oleaginosa con la que se han realizado investigaciones en la producción de biogás es el girasol, Zhurka et al, (2020) evaluó esta planta con pretratamiento alcalino, el sustrato se secó en un horno a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y posteriormente se agregaron 4 g de NaOH por cada 100 g de ST para someterlo a DA a temperatura controlada ($37 \text{ }^\circ\text{C}$) durante un TRH de 25 días, el resultado encontrado pasó de $127.98 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con el girasol sin tratar a $268.35 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con pretratamiento, valor que se encuentra por debajo del obtenido con las PASRc con las mismas condiciones, Mehdi Hesami et al, (2015) también usaron las partes aéreas del girasol secado al sol durante 3 días para la producción de biogás pero aplicando pretratamiento ácido con un TRH equivalente a 45 días e igualmente a temperatura controlada, el resultado obtenido pasó de $124 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ sin tratamiento a $278 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con 1 % (p/p) de H_2SO_4 , obteniendo un incremento de 124.2 %, mientras que para las PASRc con las mismas condiciones pero con HCl se encontró una disminución en el rendimiento de biogás de 50.9 %, lo que indica que el pretratamiento ácido no fue efectivo para este sustrato.

Pérez-Rodríguez et al. (2016), estudiaron el efecto de enzimas sobre la mazorca de maíz deshidratada a temperatura ambiente para la producción de biogás, el experimento se realizó con un coctel de enzimas que contenía glucanasa, xilonasa, celobiasa y celulasa con un TRH de 37 días, ellos encontraron una producción de biogás de $446.85 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, lo que supera 4 veces al mayor rendimiento obtenido con enzima celulasa a PASRc a $37 \text{ }^\circ\text{C}$.

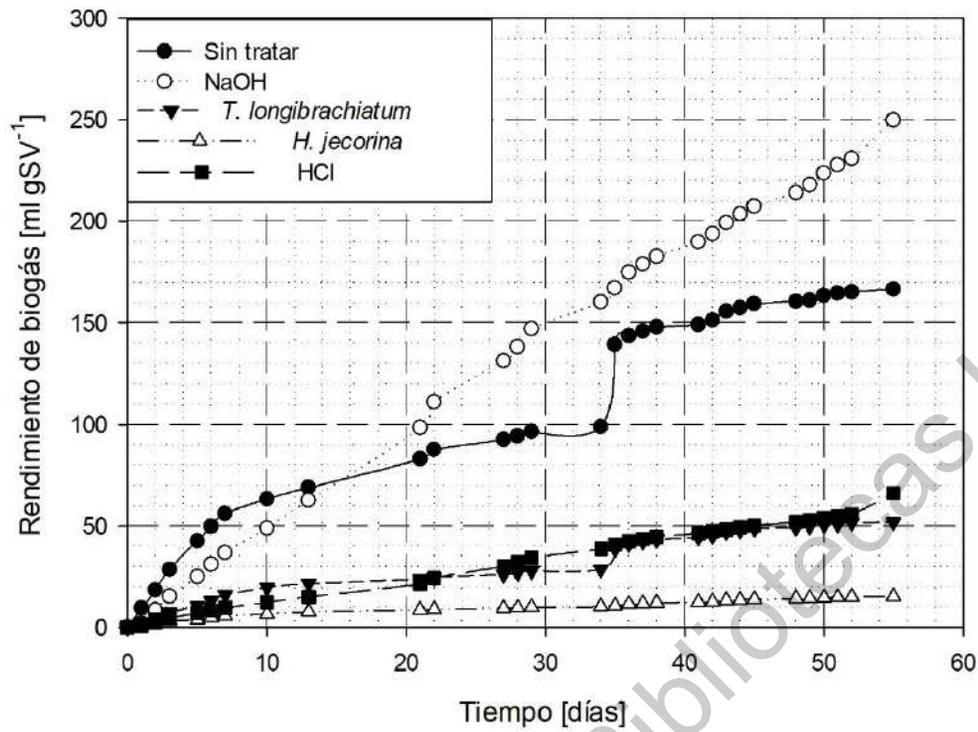


Figura 6. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de *R. communis* seca a temperatura ambiente

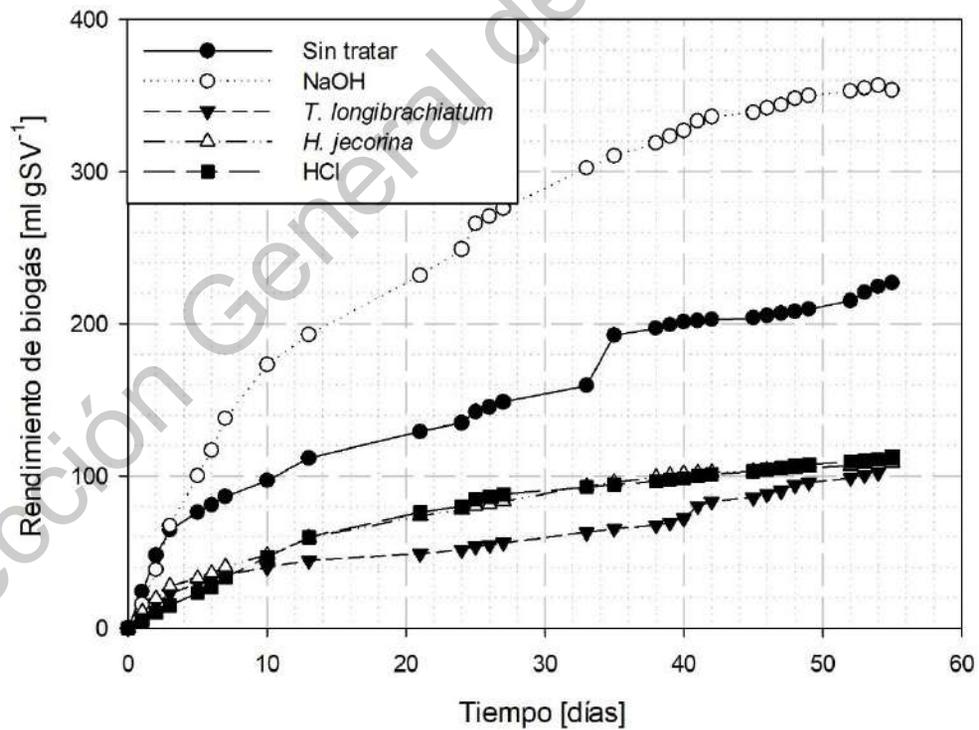


Figura 7. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de *R. communis* seca a 37 °C

El rendimiento de las PAHRc a temperatura ambiente y controlada se muestran en las **Figuras 8 y 9** respectivamente, en cuanto a posición en el rendimiento de biogás a temperatura ambiente, en primer lugar está el tratado con NaOH con $230.96 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, seguido del control con $83.28 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, posteriormente se tiene el tratado con HCl con $66.06 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, en cuarto lugar está el tratado con celulosa con un $51.90 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ y finalmente se encuentra el tratado con enzima celobiohidrolasa con $14.95 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, sin embargo, la temperatura controlada cambió estas posiciones, observándose el mayor rendimiento con el pretratado con celobiohidrolasa $233.21 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, seguido del HCl con $227.18 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, el control con $86.57 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, el pretratado con NaOH con $44.93 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ y finalmente el tratamiento con celulosa $26.76 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, para los resultados obtenidos a partir de las partes húmedas, y la temperatura controlada solo los tratamiento con celobiohidrolasa y con HCl incrementaron sus producciones de biogás, un estudio realizado por Jia et al, (2014) aplicando los mismos pretratamientos (químicos y uno enzimático) pero a residuos de frutas y hortalizas, demuestra eficacia de los pretratamientos en otro tipo de sustrato, debido a que para el control obtuvieron $125 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, mientras que para el tratamiento con NaOH al 1 % (p/v) encontraron $300 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, para el tratamiento con enzima celulosa el resultado fue de $580 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ y para el tratamiento con 0.25 % (p/v) se obtuvo $730 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, en este sentido se encuentra conveniente la aplicación de pretratamientos a sustratos con más contenido de azúcares para mejores resultados. Por otra parte, Dhanya et al, (2009) evaluaron los residuos agrícolas de *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae) planta con potencial para la producción de biogás, aunque no aplicaron pretratamientos, realizaron co-digestión con estiércol de ganado, el experimento tuvo un TRH de 10 semanas a temperatura controlada (35 °C) encontrando un rendimiento de biogás de $403.84 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, este estudio podría considerarse para realizar también co-digestión a las PAHRc para un mejor rendimiento en la producción de biogás.

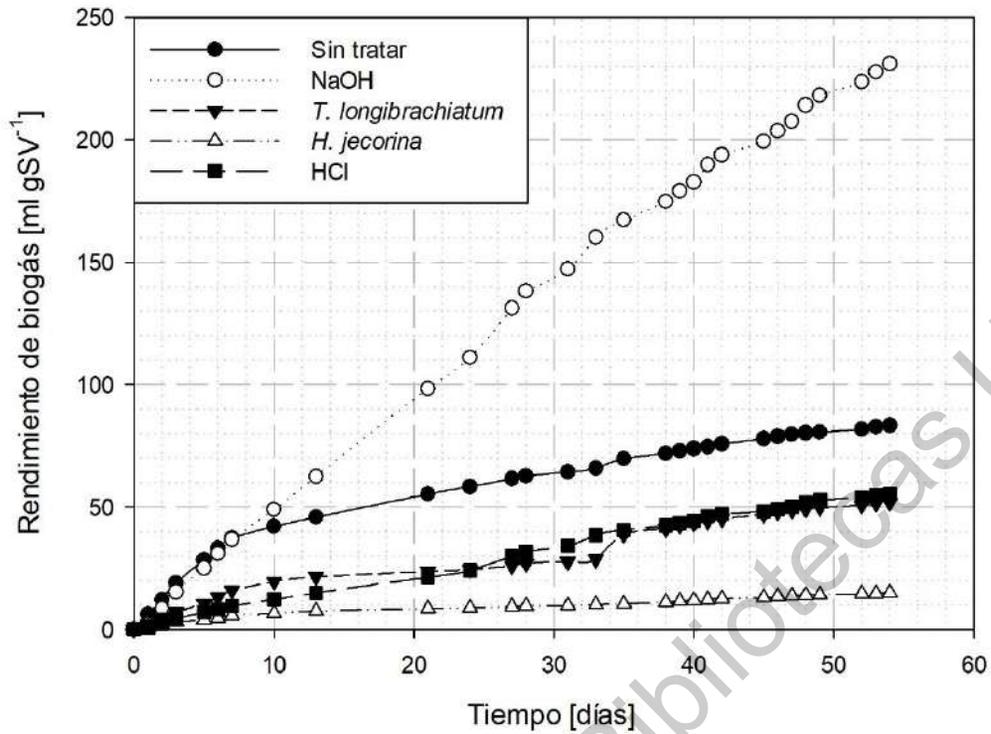


Figura 8. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de *R. communis* húmeda a temperatura ambiente.

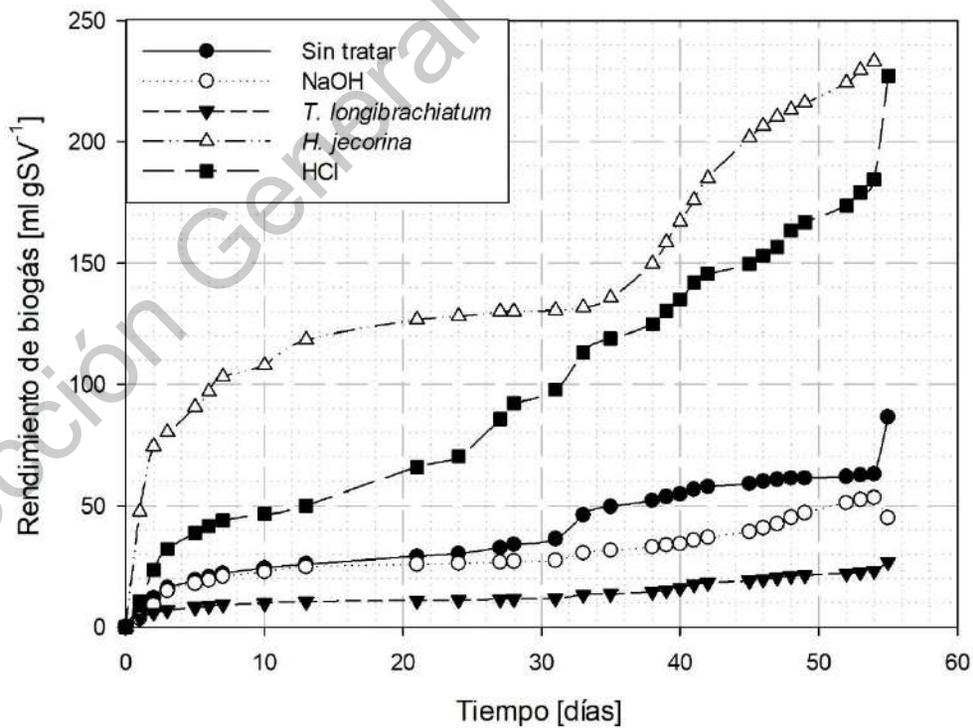


Figura 9. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de *R. communis* húmeda a 37 °C.

En la **Figura 10** se muestran los rendimientos de biogás al BSRc a temperatura ambiente donde se observó un rendimiento máximo de $263 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ para el control, seguido de $206.57 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ para el tratado con HCl, $202.52 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ para la celulasa, $196.71 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con celobiohidrolasa y finalmente un mínimo de $42.11 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con tratamiento alcalino, sin embargo, los rendimientos se incrementaron al controlar la temperatura y los pretratamientos produjeron incremento sobre el bagazo, en la **Figura 11** se puede observar este efecto, debido a que el que obtuvo mayor rendimiento fue el enzimático celulasa con $460.63 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, seguido del tratamiento ácido con $373.57 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, el control con $369.18 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, el tratado con enzima celobiohidrolasa $100.37 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ y finalmente el tratamiento alcalino alcanzó $78.51 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$, la producción de biogás a partir de bagazo de la semilla de la misma especie se realizó por Bateni et al. (2014), ellos realizaron tratamiento alcalino al 8 % (p/v), obteniendo un rendimiento de $252,1 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ para el control y $186.4 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con NaOH con un TRH de 45 días, lo que demuestra también un efecto negativo para el tratamiento alcalino, el alto potencial de producción de biogás a partir de bagazo no tratado probablemente se debió al aceite que permaneció en la estructura del bagazo que generalmente se convierte en biogás con alto rendimiento, además la hidrólisis del aceite a través de la reacción de saponificación, que es la reacción entre el aceite restante y el NaOH en presencia de agua, pudo producirse durante el pretratamiento alcalino, por lo tanto, la solución de NaOH pudo inducir la reacción de saponificación en lugar de realizar su propósito como pretratamiento, en consecuencia, la eficacia del pretratamiento se redujo y los sustratos pretratados, que no tenían aceite, produjeron menos metano durante la digestión anaeróbica (Bateni et al., 2014; G. Kevrekidis & Y. Shvartsman, 2004).

Otro estudio realizado por Raheman & Mondal (2012) determinaron la producción de biogás a partir de bagazo de jatropha donde alcanzaron un rendimiento de $166 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con un TRH de 40 días, en contraste con la investigación realizada por Chandra et al. (2012) en su estudio de pretratamiento alcalino a bagazo de jatropha, encontró un rendimiento máximo de biogás de $80.8 \text{ ml} \cdot \text{gSV}^{-1}$ con un TRH de 30 días, ambos valores fueron inferiores a los

encontrados para el BSRc lo que corrobora el potencial para producción de biogás de este sustrato.

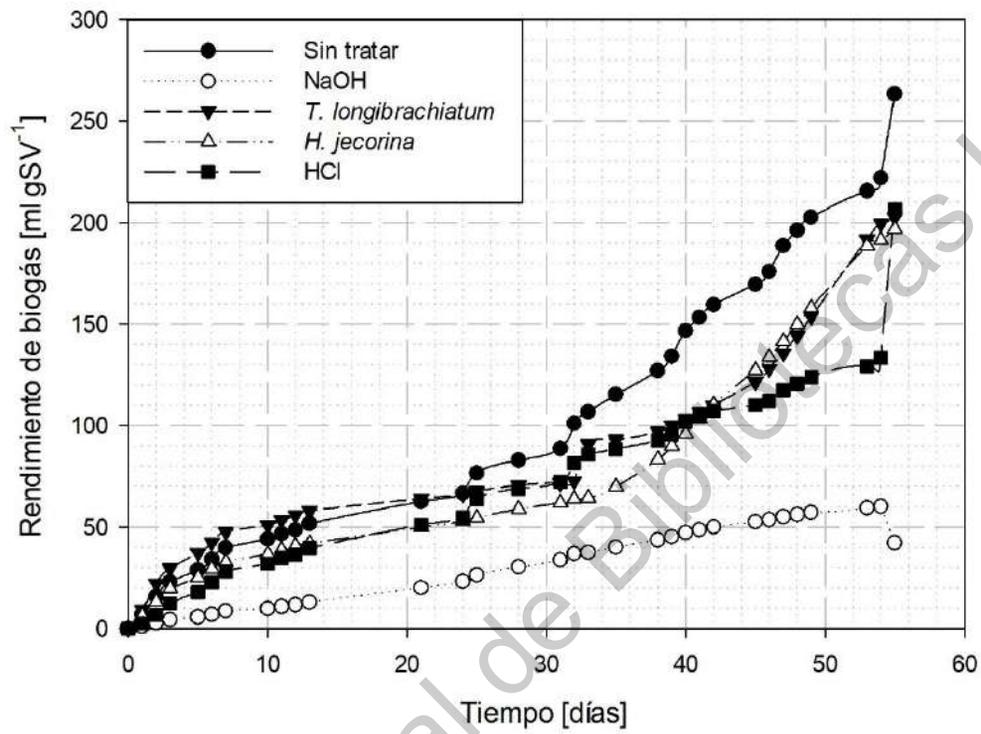


Figura 10. Rendimiento de producción de biogás en biomasa pretratada de bagazo de semilla a temperatura ambiente

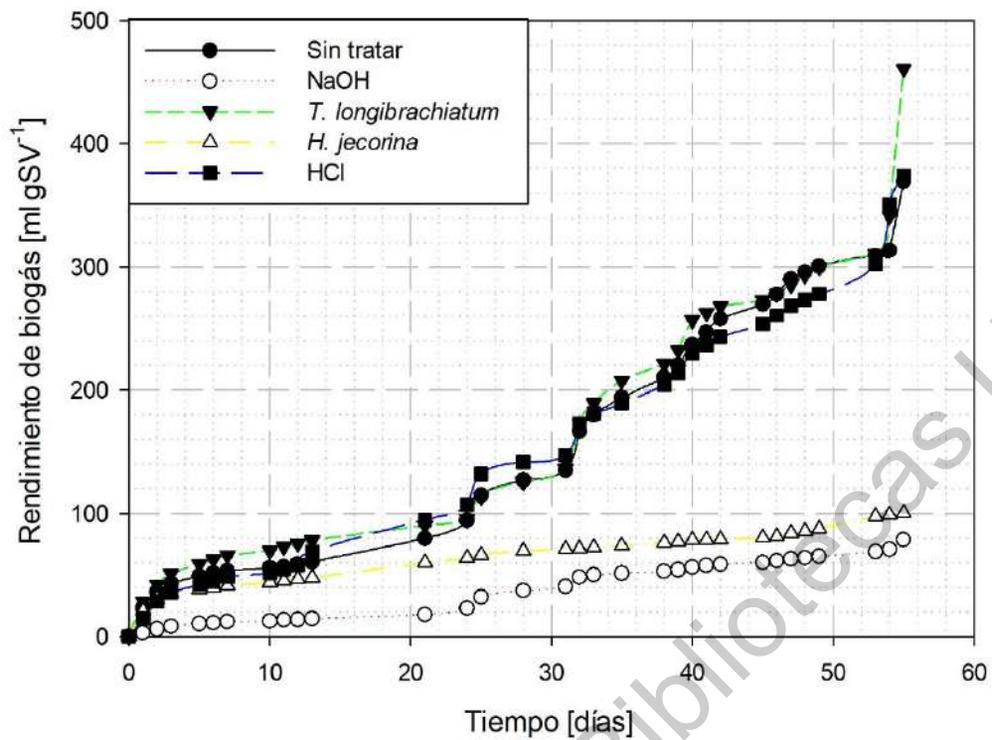


Figura 11. Rendimiento de producción de biogás en bagazo de semilla pretratado a 37 °C

Dirección General de Bibliotecas UAQ

CONCLUSIONES

Los residuos de *R. communis* son sustratos con potencial para la producción de biogás, siendo el bagazo de semilla el que reflejó las mayores producciones de biogás, seguida de las partes aéreas secas y de las partes aéreas húmedas, logrando mayores producciones a 37 °C que a temperatura ambiente.

El pretratamiento que mostró el mayor rendimiento de biogás para el bagazo de la semilla de *R. communis* fue el de la enzima celulasa, seguido del control, el HCl, la enzima celobiohidrolasa y el NaOH. Para las partes aéreas secas de *R. communis* mostraron el mayor rendimiento de biogás con NaOH, seguido del control, el HCl, enzima celulasa y celobiohidrolasa. Mientras que para las partes aéreas húmedas de *R. communis*, el pretratamiento que mayor producción de biogás obtuvo fue el HCl, seguido del NaOH, enzima celobiohidrolasa, sin tratar y enzima celulasa.

LITERATURA CITADA

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 5, pp. 3228–3242). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>
- Adl, M., Sheng, K., & Gharibi, A. (2012). Technical assessment of bioenergy recovery from cotton stalks through anaerobic digestion process and the effects of inexpensive pre-treatments. *Applied Energy*, 93, 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.065>
- Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., & Levin, D. B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, 29(6), 675–685. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.005>
- Al Seadi, T., Rutz, D., Janssen, R., & Drosch, B. (2013). Biomass resources for biogas production. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 19–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.19>
- Alberto, C., Bustamante, G., & Cerutti, O. M. (2016). *ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO*.
- Alves, E. E. N., Souza, C. D. F., Inoue, K. R. A., & Leite, T. D. S. (2010). Potential of production of biogas from the castor bean (*Ricinus communis* L.) cake. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010*, 5(10), 9–3834. <https://doi.org/10.13031/2013.29831>
- Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. (n.d.). Retrieved February 22, 2021, from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Badshah, M., Lam, D. M., Liu, J., & Mattiasson, B. (2012). Use of an Automatic Methane Potential Test System for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. *Bioresource Technology*, 114, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.022>
- Barua, V. B., Goud, V. V., & Kalamdhad, A. S. (2018). Microbial pretreatment of water hyacinth for enhanced hydrolysis followed by biogas production. *Renewable Energy*,

126, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.028>

- Baskar, C., Baskar, S., & Dhillon, R. S. (2012). Biomass conversion: The interface of biotechnology, chemistry and materials science. In C. Baskar, S. Baskar, & R. S. Dhillon (Eds.), *Biomass Conversion: The Interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science* (Vol. 9783642284182). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28418-2>
- Batani, H., Batani, F., & Karimi, K. (2017). Effects of Oil Extraction on Ethanol and Biogas Production from *Eruca sativa* Seed Cake. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 1897–1905. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9731-x>
- Batani, H., & Karimi, K. (2016). Biorefining of *Eruca sativa* plant for efficient biofuel production. *RSC Advances*, 6(41), 34492–34500. <https://doi.org/10.1039/c5ra27062f>
- Batani, H., Karimi, K., Zamani, A., & Benakashani, F. (2014). Castor plant for biodiesel, biogas, and ethanol production with a biorefinery processing perspective. *Applied Energy*, 136, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.005>
- Bolaji, S., & APUYORBenson, O. (2014). *Castor Oil Plant (Ricinus communis L.): Botany, Ecology and Uses*.
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy*, 43(1), 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.029>
- Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., & Khura, T. K. (2012). Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes. *Applied Energy*, 93, 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.049>
- Chen, Y., Yang, H., Zou, H., Sun, T., Li, M., Zhai, J., He, Q., Gu, L., & Tang, W. Z. (2020). Effects of acid/alkali pretreatments on lignocellulosic biomass mono-digestion and its co-digestion with waste activated sludge. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123998>
- Da Costa Gomez, C. (2013). Biogas as an energy option. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 1–16). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1>

Demand, C. O. (2005). *The Science of Oxidation Efficiency of Organic Compounds*.

Dhanya, M., Gupta, N., & Joshi, H. (2009). Biogas Potentiality of Agro-wastes Jatropha Fruit Coat. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 3(3), 432–436.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Biogas+Potentiality+of+Agro-wastes+Jatropha+Fruit+Coat#0>

Dick, E. (2015). *Fundamentals of Turbomachines* (Vol. 109). Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9627-9>

Domínguez Gómez, J. A. (2008). Energías Alternativas. In *Equipo Sirius*.
<https://books.google.com.mx/books?id=Nd5axwEACAAJ&dq=inauthor:%22José+A.+Domínguez+Gómez%22&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi7mqy35YjvAhUCba0KHh-RC5cQ6AEwAHoECAAQAQ>

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>

Elton Eduardo Novais Alves, Cecília de Fátima Souza, Keles Regina Antony Inoue, & Tiago de Souza Leite. (2010). Potential of production of biogas from the castor bean (*Ricinus communis* L.) cake. *2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20 - June 23, 2010*, 5, 3829–3834. <https://doi.org/10.13031/2013.29831>

Fang, Z. (2013). Pretreatment Techniques for Biofuels and Biorefineries. In Z. Fang (Ed.), *Green Energy and Technology* (Vol. 115). Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-32735-3>

G. Kevrekidis, I., & Y. Shvartsman, S. (2004). Chemical Reactor Analysis and Design Fundamentals. *Chemical Engineering Science*, 59(10), 2123–2124.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.12.030>

Ghavinati, H., & Tabatabaei, M. (2018). Biogas: Fundamentals, Process, and Operation. In *Springer*.

Gomez-Tovar, F., Celis, L. B., Razo-Flores, E., & Alatraste-Mondragón, F. (2012). Chemical and enzymatic sequential pretreatment of oat straw for methane production. *Bioresource Technology*, 116, 372–378.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.109>

Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 42, pp. 712–725). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>

Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. In *Bioresource Technology* (Vol. 100, Issue 1, pp. 10–18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>

Hilioti, Z., Michailof, C. M., Valasiadis, D., Iliopoulou, E. F., Koidou, V., & Lappas, A. A. (2017). Characterization of castor plant-derived biochars and their effects as soil amendments on seedlings. *Biomass and Bioenergy*, 105, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.022>

Islam, M. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2015). Pyrolysis kinetics of raw and hydrothermally carbonized Karanj (*Pongamia pinnata*) fruit hulls via thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 179, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.115>

Jia, X., Li, M., Xi, B., Zhu, C., Yang, Y., Xia, T., Song, C., & Pan, H. (2014). Integration of fermentative biohydrogen with methanogenesis from fruit-vegetable waste using different pre-treatments. *Energy Conversion and Management*, 88, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.015>

Kalogiannis, K. G., Stefanidis, S. D., Michailof, C. M., & Lappas, A. A. (2016). *Castor bean cake residues upgrading towards high added value products via fast catalytic pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.001>

Kaur, R., Gera, P., Jha, M. K., & Bhaskar, T. (2018a). Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.077>

Kaur, R., Gera, P., Jha, M. K., & Bhaskar, T. (2018b). Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 250, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.077>

Kolesárová, N., Hutan, M., Bodík, I., & Špalková, V. (2011). Utilization of biodiesel by-products for biogas production. In *Journal of Biomedicine and Biotechnology* (Vol. 2011). <https://doi.org/10.1155/2011/126798>

Kumar, V., Dhall, P., Kumar, R., & Kumar, A. (2013). Bioconversion of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production. In *Biofuels Production* (pp. 85–118). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118835913.ch4>

Liew, L. N., Shi, J., & Li, Y. (2011). Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. *Bioresource Technology*, *102*(19), 8828–8834. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.005>

Mehdi Hesami, S., Zilouei, H., Karimi, K., & Asadinezhad, A. (2015). Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment. *Industrial Crops & Products*, *76*, 449–455. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.018>

Momayez, F., Karimi, K., Arváriarv'arvári Horváth, I. S. ', & Horváth, H. (2019). *Sustainable and efficient sugar production from wheat straw by pretreatment with biogas digestate*. <https://doi.org/10.1039/c9ra05285b>

Momayez, F., Karimi, K., & Horváth, I. S. (2018). Enhancing ethanol and methane production from rice straw by pretreatment with liquid waste from biogas plant. *Energy Conversion and Management*, *178*, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.023>

Monlau, F., Latrille, E., Da Costa, A. C., Steyer, J.-P., & Carrère, H. (2013). Enhancement of methane production from sunflower oil cakes by dilute acid pretreatment. *Applied Energy*, *102*, 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.042>

Moreno, M. T. V. (2011). Manual de biogás. In *Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables"* (Vol. 64, Issue 6).

Moriarty, P., & Honnery, D. (2012). What is the global potential for renewable energy? In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 1, pp. 244–252). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.151>

Murphy, J. D., & Thamsiroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 104–130). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.104>

Mutlu, H., & Meier, M. A. R. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1), 10–30. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900138>

Ogunniyi, D. S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. In *Bioresource Technology* (Vol. 97, Issue 9, pp. 1086–1091). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>

Passos, F., Hom-Diaz, A., Blaquez, P., Vicent, T., & Ferrer, I. (2016). Improving biogas production from microalgae by enzymatic pretreatment. *Bioresource Technology*, 199, 347–351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.084>

Pérez-Rodríguez, N., García-Bernet, D., & Domínguez, J. M. (2016). Effects of enzymatic hydrolysis and ultrasounds pretreatments on corn cob and vine trimming shoots for biogas production. *Bioresource Technology*, 221, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.013>

Pogaku, R., & Hj. Sarbatly, R. (2014). Advances in biofuels. In *Advances in Biofuels* (Vol. 9781461462). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6249-1>

Rabemanolontsoa, H., & Saka, S. (2016). Various pretreatments of lignocellulosics. In *Bioresource Technology* (Vol. 199, pp. 83–91). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.029>

Raheman, H., & Mondal, S. (2012). *Biogas production potential of jatropha seed cake*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.042>

Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 35, Issue 5, pp. 1633–1645). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>

Salehian, P., & Karimi, K. (2013). Alkali pretreatment for improvement of biogas and ethanol production from different waste parts of pine tree. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(2), 972–978. <https://doi.org/10.1021/ie302805c>

Sambusiti, C., Monlau, F., Ficara, E., Carrère, H., & Malpei, F. (2013). A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates. *Applied Energy*, 104, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.060>

- Sánchez-Cantú, M., Ortiz-Moreno, L., Ramos-Cassellis, M. E., Marín-Castro, M., & De la Cerna-Hernández, C. (2018). Solid-State Treatment of Castor Cake Employing the Enzymatic Cocktail Produced from *Pleurotus djamor* Fungi. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 185(2), 434–449. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2656-4>
- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., & Hankamer, B. (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *BioEnergy Research*, 1(1), 20–43. <https://doi.org/10.1007/s12155-008-9008-8>
- Scholz, V., & da Silva, J. N. (2008). Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 32, Issue 2, pp. 95–100). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.08.004>
- Schroyen, M., Vervaeren, H., Van Hulle, S. W. H., & Raes, K. (2014). Impact of enzymatic pretreatment on corn stover degradation and biogas production. *Bioresource Technology*, 173, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.030>
- Şenol, H., Açıkel, Ü., & Oda, V. (2021). Anaerobic digestion of sugar beet pulp after acid thermal and alkali thermal pretreatments. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(3), 895–905. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00539-6>
- Shafiei, M., Zilouei, H., Zamani, A., Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2013). Enhancement of ethanol production from spruce wood chips by ionic liquid pretreatment. *Applied Energy*, 102, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.060>
- Sharma, A., & Kar, S. K. (2015). Energy Sustainability Through Green Energy. In *Green Energy and Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5>
- Sinbuathong, N., Munakata-Marr, J., Sillapacharoenkul, B., & Chulalaksananukul, S. (2011). Effect of the solid content on biogas production from *Jatropha curcas* seed cake. *International Journal of Global Warming*, 3(4), 403–416. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2011.044403>
- Singh, A., & Rathore, D. (2017). Biohydrogen production: Sustainability of current technology and future perspective. In A. Singh & D. Rathore (Eds.), *Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective*. Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3577-4>
- Talha, Z., Ding, W., Mehryar, E., Hassan, M., & Bi, J. (2016). Alkaline Pretreatment of

Sugarcane Bagasse and Filter Mud Codigested to Improve Biomethane Production. *BioMed Research International*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8650597>

Telliard, W. A. (2001). Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids. *U. S. Environmental Protection Agency, January*, 13.

Tropicos | Name - Ricinus communis. (n.d.). Retrieved February 22, 2021, from <https://www.tropicos.org/name/12800093>

Uçkun Kiran, E., & Liu, Y. (2015). Bioethanol production from mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. *Fuel*, 159, 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.101>

Wang, D., Ai, P., Yu, L., Tan, Z., & Zhang, Y. (2015). Comparing the hydrolysis and biogas production performance of alkali and acid pretreatments of rice straw using two-stage anaerobic fermentation. *Biosystems Engineering*, 132, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.02.007>

Wang, J., & Yin, Y. (2017). *Biohydrogen Production from Organic Wastes*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4675-9>

Wilkinson, S., Smart, K. A., & Cook, D. J. (2014). A comparison of dilute acid- and alkali-catalyzed hydrothermal pretreatments for bioethanol production from brewers' spent grains. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 72(2), 143–153. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2014-0327-02>

Worbs, S., Köhler, K., Pauly, D., Avondet, M.-A., Schaer, M., Dorner, M. B., & Dorner, B. G. (2011). Ricinus communis Intoxications in Human and Veterinary Medicine-A Summary of Real Cases. *Toxins*, 3, 1332–1372. <https://doi.org/10.3390/toxins3101332>

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Zhang, S., Zou, L., Wan, Y., Ye, M., Ye, J., Li, Y. Y., & Liu, J. (2020). Using an expended granular sludge bed reactor for advanced anaerobic digestion of food waste pretreated with enzyme: The feasibility and its performance. *Bioresource Technology*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123504>

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 42, Issue 1, pp. 35–53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>

Zhurka, M., Spyridonidis, A., Vasiliadou, I. A., & Stamatelatou, K. (2020). Biogas production from sunflower head and stalk residues: Effect of alkaline pretreatment. *Molecules*, 25(1). <https://doi.org/10.3390/molecules25010164>

Ziemiński, K., Romanowska, I., & Kowalska, M. (2012). Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production. *Waste Management*, 32(6), 1131–1137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.016>

Dirección General de Bibliotecas UJAQ