



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MEZCLAS DE  
BAGAZO DE SEMILLA DE HIGUERILLA (*Ricinus communis*)  
COMO FUENTE ENERGÉTICA ALTERNATIVA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA**

**PRESENTA**

**I.Q.A. LUIS EDUARDO GARCÍA VANEGAS**

**DIRIGIDA POR**

**Dr. MIGUEL ANGEL RAMOS LÓPEZ**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2021.**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DEL 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 datos de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

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



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

**“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MEZCLAS DE BAGAZO DE SEMILLA DE HIGUERILLA (*Ricinus communis*) COMO FUENTE ENERGÉTICA ALTERNATIVA”**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias de la Energía

**Presenta:**

Luis Eduardo García Vanegas

**Dirigido por:**

Dr. Miguel Angel Ramos López

Dr. Miguel Angel Ramos López  
Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Francisco Javier de Moure Flores  
Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza  
Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

Dra. Luz Arcelia García Serrano  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez  
Suplente

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_  
Dra. Silvia Lorena Amaya Llano  
Director de la Facultad

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

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Enero, 2021  
México

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

...A mi familia  
A mis verdaderos amigos  
Al Dr. Miguel Angel Ramos  
y todo aquel que creyó  
en mí a lo largo de este  
sinuoso trayecto.  
En verdad gracias...

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primera, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de este trabajo de tesis.

Sin duda la maestría ha sido una de las etapas más complicadas de mi vida hasta el día de hoy, pero sin duda también una de las más gratificantes.

Conocí a personas increíbles pese a toda la adversidad posible. Estuve a prueba por mucho tiempo con mi paciencia y madurez para afrontar las cosas, pero sin duda, he salido fortalecido de esto.

Le doy mis más sinceras gracias al Dr. Ramos, que estuvo ahí para ayudarme a salir adelante y el apoyo académico y tutorial para hacerme sacar hasta la última gota de esfuerzo de mí y completar este trabajo.

Agradezco al equipo de handball, sobre todo a los amigos más cercanos que logré hacer: Joaquín, Alex, Tadeo, Zúñiga, Kirmin, Chava y el resto del equipo que estuvo ahí alguna vez para darme esas palabras de aliento. Ustedes comprendieron mis estados de ánimo y la necesidad que tenía a veces de sacar todo el estrés mediante ese balón. Me integraron al equipo e hicieron sentir a una familia. Estoy seguro de que me voy con experiencias para toda la vida, como los torneos y salidas vividas, así como comprender al 100% el espíritu de compañerismo y amistad dentro del deporte y la vida.

A mis amigos que estuvieron para escucharme en momentos en que estaba a punto explotar y dejarlo todo, y que, sin embargo, me dieron el impulso para no caerme: Julieta, Mónica, Antero, Josu, Israel (Capi), Diana Mata, Lina y Miguel. Este proceso no comenzó fácil y no podía terminar sencillo tampoco, pero se terminó y en verdad estoy feliz de haber podido descubrir una nueva manera de sentir y vivir.

Finalmente, a Andrea, que apareció en mi vida prácticamente al final de este proceso, pero no es menos importante, ya que me animó y estuvo a mi lado cuando ya no quería terminar este trabajo y dejarlo de lado. Pacientemente me entregó cada segundo de su tiempo hasta que estuve listo para continuar y me apoyó cuando necesité finiquitar las últimas palabras en este trabajo. Infinitas gracias.

A mi familia, siempre ahí, soportando cada detalle de mi personalidad, pero dándome todo el cariño para siempre salir adelante.

A todos aquellos que estuvieron en momentos puntuales para ayudarme, hacerme pasar un buen rato o hasta una pequeña distracción y no fueron mencionados, saben que también van en mi corazón.

Gracias por ayudarme a crecer en este proceso del que sin duda salgo más fortalecido que nunca. A lo que sigue...

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	
ABSTRACT	
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES	3
2.1 Situación de la energía de origen fósil en el mundo.	3
2.2 Biocombustibles como alternativa.	8
2.2.1 Primera generación	8
2.2.2 Segunda generación	8
2.2.3 Tercera generación	9
2.2.4 Cuarta generación	9
2.3 Panorama socioeconómico de México	10
2.4 Biogás	12
2.4.1 Etapas de formación del biogás	13
2.5 Factores que influyen en la producción de biogás.	16
2.5.1 Tipo de materia prima	16
2.5.2 Temperatura.	18
2.5.3 Acidez en el sistema: pH.	19
2.5.4 Relación Carbono – Nitrógeno (C/N).	20

2.5.5 Contenido de sólidos	21
2.5.6 Nutrientes	21
2.5.7 Potencial redox	21
2.6 Biodigestores o biorreactores.	22
2.6.1 Variables que se consideran en el diseño de un biodigestor.	23
2.6.2 Tipos de biodigestores utilizados para biogás.	24
2.7 Biogás a partir de bagazo.	27
2.8 Compostaje.	30
2.8.1 Condiciones a cuidar en el compostaje.	30
2.8.2 Etapas del compostaje.	31
2.9 Generalidades de la higuera ( <i>Ricinus communis</i> ).	33
2.10 Higuera en México.	36
2.11 Usos de la higuera	37
3 OBJETIVOS	39
3.1 General	39
3.2 Específicos	39
4 HIPÓTESIS	40
5 METODOLOGÍA	41
5.1 Adquisición de sustratos: Bagazo de semilla de higuera ( <i>Ricinus communis</i> ) y heces de cerdo.	41
5.2 Análisis químicos del bagazo y de las mezclas de bagazo con heces de cerdo.	41
5.2.1 Análisis de carbono mediante el método de Walkey y Black.	41
5.2.2 Análisis de nitrógeno total mediante el método de Kjeldahl:	42
5.2.3 Cálculo de la relación carbono – nitrógeno.	43

5.3 Elección y construcción del biorreactor.	43
5.4 Obtención de biogás mediante bagazo de semilla de higuera.	44
5.5 Obtención de biogás mediante mezcla de bagazo – heces de cerdo.	46
5.6 Realización de composta.	47
5.7 Análisis estadístico.	48
<b>6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>49</b>
6.1 Resultados de la relación Carbono – Nitrógeno	49
6.2 Obtención de biogás mediante distintas cantidades de bagazo de semilla de higuera.	51
6.2.1 Evolución en la obtención de biogás con bagazo de semilla de higuera en distintas cantidades.	51
6.2.2 Evolución del pH.	54
6.2.3 Biogás acumulado proveniente del bagazo de semilla de higuera en distintas cantidades.	56
6.3 Obtención de biogás mediante distintas mezclas de bagazo de semilla de higuera con heces de cerdo.	58
6.3.1 Evolución en la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	58
6.3.2 Evolución del pH en los reactores de la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	61
6.3.3 Biogás acumulado proveniente de las mezclas de bagazo de semilla de higuera con heces de cerdo.	63
6.4 Composta a partir de los residuos de mezclas de bagazo de higuera - heces de cerdo.	64
<b>7 CONCLUSIONES</b>	<b>66</b>
<b>8 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

No.		Pág.
1	Proyección en la producción de petróleo para el período 2020 (BP, 2020).	3
2	Descubrimientos mundiales de petróleo. (Smith, 2020).	4
3	Valores EROI de gas y petróleo en algunos países durante el período 1990-2010 (Hall et al., 2014)	5
4	Producción de petróleo en México y proyecciones año por año hasta 2025, en miles de barriles diarios (Kerimova et al., 2016).	6
5	Estrategia Federal de transición hacia energías limpias en México (Ley de Transición Energética, 2020).	7
6	Usuario de leña por municipio en México (COFEPRIS, 2017).	11
7	Emisiones contaminantes según el combustible utilizado para cocinar en relación con el Gas Licuado de Petróleo (GPL=1.0) (Smith et al., 2013).	13
8	Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos y grupos de bacterias que intervienen en cada etapa del proceso (Moraes et al., 2015).	15
9	Diagrama general de un biodigestor anaerobio para la generación de biogás a partir de biomasa (FAO, 2020).	23
10	Esquema de un biorreactor de mezcla completa sin recirculación (IDAE y Besel, 2007).	25



11	Esquema de un biorreactor de mezcla completa sin recirculación (IDAE y Besel, 2007).	25
12	Esquema de un biorreactor de flujo pistón (IDAE y Besel, 2007).	26
13	Esquema de un reactor anaeróbico de contacto (Portales, 2011).	26
14	Esquema de un reactor UASB (ITRI, 2019).	27
15	Etapas del compostaje (Villas e Ingouville, 2019).	33
16	<i>Ricinus communis</i> (Fuente propia).	34
17	Distribución de <i>Ricinus communis</i> en México (Naturalista, 2019).	36
18	Sistema de biorreactores para la producción de biogás (Fuente propia).	44
19	Sistema de probetas utilizado para la medición de biogás.	45
20	Composteros utilizados para la producción de composta.	48
21	Evolución de la obtención de biogás con distintas cantidades de bagazo de semilla de higuera (C+= Control positivo; 10%, 15%, 20%, 25% = porcentajes de bagazo de higuera utilizados).	50
22	Evolución del pH en los reactores de los distintos tratamientos para la obtención de biogás con semilla de bagazo de higuera. Se incluyen las barras de error estándar.	55
23	Acumulación de biogás en la producción con semilla de bagazo de higuera (C+= Control positivo; 10%, 15%, 20%, 25% = porcentajes de bagazo de higuera utilizados).	57
24	Evolución de la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	59

25	Evolución del pH en los reactores de los distintos tratamientos para la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	62
26	Acumulación de biogás en la producción con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	63

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## ÍNDICE DE CUADROS

No.		Pág.
1	Composición química del biogás.	13
2	Producción y composición teórica de biogás para diversos compuestos orgánicos.	16
3	Producción de biogás por tipo de residuo animal.	17
4	Producción de biogás por tipo de residuo vegetal.	18
5	Rangos de temperatura y tiempos óptimos de digestión anaerobia.	19
6	Clasificación taxonómica de la higuera ( <i>Ricinus communis</i> )	35
7	Composición de bagazo de higuera (BH) y heces de cerdo (HC) para estudiar su producción potencial de biogás.	45
8	Composición de bagazo de higuera (BH) y heces de cerdo (HC) para estudiar su producción potencial de biogás.	46
9	Abreviaturas utilizadas en el experimento producción de biogás con mezclas de bagazo semilla de higuera y heces de cerdo.	47
10	Relaciones carbono – nitrógeno del bagazo de higuera y las heces de cerdo.	49
11	Relaciones carbono – nitrógeno calculadas para cada tratamiento.	50
12	Evolución de la producción de gas con bagazo de semilla de higuera en mL·g <sup>-1</sup> de sólidos totales.	53

13	Evolución de la producción de gas con mezclas bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.	60
14	Compostas obtenidas a partir de los tratamientos de la obtención de biogás.	65

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## RESUMEN

México es un país atrasado tecnológicamente en la distribución energética a los hogares, debido tanto a causas geográficas como socioeconómicas. Tan sólo se calcula que para 2017, unos 26 millones de mexicanos obtienen energía calorífica para sus hogares a partir de leña, una opción con consecuencias a la salud severas a corto y largo plazo. Una opción para suplir esta necesidad es la obtención de biogás a partir de distintos residuos, sobre todo de cultivos energéticos. En el presente trabajo se llevó a cabo la obtención de biogás a partir de residuos de un cultivo energético: *Ricinus communis*, llamada comúnmente "higuerilla". Distintas cantidades de bagazo de higuerilla (concentraciones de 10% a 25% en sólidos totales) y de mezclas de heces de cerdo y bagazo de higuerilla (en concentraciones totales de 10% en sólidos) se utilizaron para tal fin. El objetivo fue conseguir las condiciones de concentración donde se obtuvo mayor cantidad y mejor calidad (cercano a una relación 70% metano – 30% dióxido de carbono) de biogás. En cuanto a la cantidad de biogás, se obtuvo un mayor rendimiento fue de  $5.2 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ , en el caso de utilizar sólo bagazo de higuerilla al utilizar una concentración de sólidos totales en 10%. En el caso de las mezclas, el mayor rendimiento fue  $4.8 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  al tener una concentración 5% de heces de cerdo y 5% de bagazo de higuerilla. Los residuos fueron dispuestos en composta con suelo en relación 1:5. Las perspectivas del proyecto son conocer la composición química del biogás así como de la composta.

**Palabras clave:** biogás, *Ricinus communis*, bagazo, cultivo energético, heces de cerdo.

## ABSTRACT

México is a technologically obsolete country about the energy distribution around its territory due geographical and socioeconomic causes. In 2017, it was calculated 26 million people produced their calorific energy with wood, an unhealthy option with consequences at short and long term. To replace this necessity exist options with less risks as biogas from residues, overall energy crops. In this work, biogas was obtained from residues of an energy crop: castor plant (*Ricinus communis*). Different quantities of castor seed bagasse (10% to 25% total solids concentrations) and mixtures of pig feces and castor seed bagasse (10% total solids concentrations) was employed to the obtention. The objective was to get the optimum conditions of concentration where to obtain the major quantity and the best quality (~70% methane - 30% carbon dioxide) of biogas. About biogas quantity, in the experiment with the use of only castor seed bagasse, more quantity was  $5.2 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  obtained with a total solid concentration of 10%. In case of mixtures, better yield was  $4.8 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  when using 5% castor seed bagasse and 5% pig feces on total solid concentration. Residues were composted with soil relation 1:5. Perspectives of the project consist on analyzing the chemical composition of biogas and compost.

**Keywords:** biogas, *Ricinus communis*, seed bagasse, energy crop, pig feces.

## 1 INTRODUCCIÓN

México es un país en crecimiento que cuenta aún con reservas energéticas de origen fósil y, por tanto, la generación de energía primaria proviene de este tipo de fuentes. Sin embargo, los pozos petroleros de donde proviene la mayor parte de estas fuentes, están entrando a una etapa de decaimiento, una vez que se sabe que se ha superado el pico de Hubbert, y ante el aumento cada vez mayor de la demanda energética, es necesario hallar alternativas, preferentemente amigables con el medio ambiente, que ayuden a satisfacer la necesidad y que paulatinamente la reemplacen.

Otro punto que se debe de resolver en el país es la irregular distribución de energía, tanto eléctrica como calorífica, debido a cuestiones geográficas (lugares alejados o incomunicados debido a falta de vías de comunicación o accidentes tales como valles, montañas, ríos, que impidan el contacto regular con tales comunidades) y socioeconómicas (pobreza, principalmente). La generación de energía calorífica es una de las principales cuestiones que se deben resolver ante la imposibilidad de evadir su uso debido a que es esencial para la preparación de alimentos, aseo y calefacción. La alternativa más usada ha sido la leña, contabilizando hasta cerca de 27 millones de usuarios en México hacia el 2017 (cerca de una cuarta parte de la población). Esta forma de generar energía trae graves consecuencias a la salud a corto y largo plazo, debido a la cantidad de gases tóxicos que libera, llegando incluso a la muerte.

Una solución para los problemas planteados, tanto la futura incapacidad de combustibles fósiles de satisfacer por sí mismos las necesidades energéticas mundiales como la distribución insuficiente de energía en el país son las energías provenientes de la biomasa, en este caso específico, el biogás. Este tipo de energía se utiliza principalmente para la generación de calor y proviene de la descomposición de la materia orgánica en medio anaeróbico, lo cual se hace incluso de manera natural en las condiciones adecuadas. Se conoce desde hace décadas,

pero su investigación reciente ha traído como resultado que se trate como una alternativa viable económica y tecnológicamente para satisfacer las demandas de algunos sectores sociales en desventaja. Al poder utilizarse residuos orgánicos como sustrato (heces de animales, desperdicios orgánicos, entre otros) y no requerir instalación o mantenimiento costosos, como una opción viable.

Por otro lado, la higuera (*Ricinus communis*) es un cultivo energético, es decir, una especie vegetal utilizada exclusivamente para la producción energética, con enorme potencial en el país. Las condiciones geográficas hacen que la mayor parte del territorio sean idóneas para su cultivo. Desde hace unos años, se está impulsando su producción de esta especie como una forma alternativa de energía mediante la obtención de su aceite, y también, como actividad económica en zonas de difícil acceso y condiciones climáticas adversas, por su facilidad de cuidado y adaptación a diversos tipos de suelo. Sin embargo, el residuo de la extracción de aceite, llamado bagazo, es altamente tóxico (miles de veces mayor que el cianuro) por el contenido de ricina. Se han buscado alternativas como utilizarlo para alimento de ganado y composta, pero esto no termina de eliminar el riesgo que supone la ricina.

Por ello se propone en el trabajo presente, la utilización de bagazo como sustrato, solo y en combinación con heces de cerdo, para la obtención de biogás y posterior compostaje, resolviendo las necesidades energéticas de comunidades de difícil acceso y/o desventajas socioeconómicas, además obteniendo un biocombustible, ayudando a reducir la dependencia de combustibles fósiles.



## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Situación de la energía de origen fósil en el mundo.

A finales del siglo XIX, el crecimiento de la población a nivel mundial comenzó a ser exponencial coincidiendo con el inicio del uso del petróleo y sus derivados como fuentes principales de energía. En 2012 se alcanzaron 7 mil millones de habitantes, cifra 7 veces superior a cuando se comenzó a usar petróleo. Para el año 2013, alrededor del 80 % de la energía utilizada provenía de fuentes fósiles (petróleo 32 %, carbón 27 % y gas 21 %), mientras que 95 % del transporte, utiliza combustibles fósiles (Ferrari, 2013).

En condiciones de libre mercado y demanda creciente, cualquier recurso finito sube su producción hasta un pico a partir del cual comienza un declive. Esta condición fue estudiada en 1956 por M. Hubbert, ingeniero geofísico de la compañía Shell. A través de su trabajo publicado en la revista *Nuclear Energy and Fossil Fuels*, en donde demostró su premisa, en la cual predijo esta caída para 1970. Sin embargo, con las nuevas técnicas de extracción, se llegó a ralentizar este pico hasta la década de 2010, como se muestra en la figura 1. Se estima que 60 países ya superaron el pico de producción en 2010 y para 2030 el resto de los países también lo habrá hecho (Rapier, 2016).

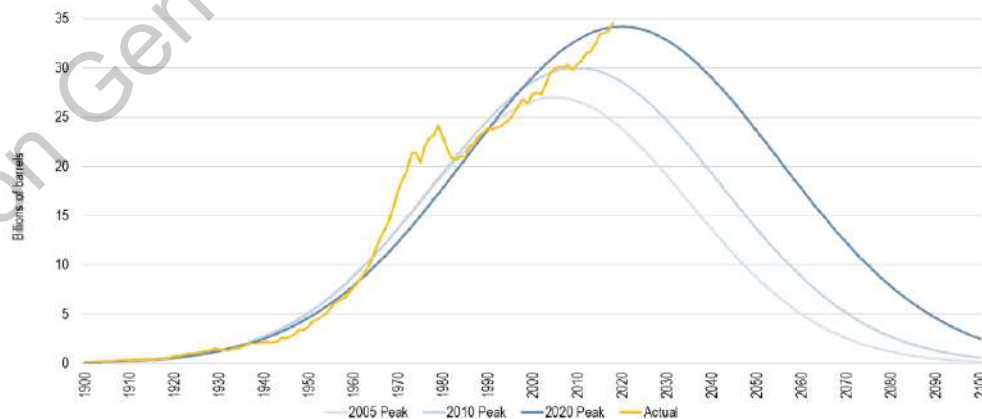


Figura 1. Proyección en la producción de petróleo para el período 2020 (BP, 2020).

Un indicador del declive productivo es la falta de descubrimientos de yacimientos de petróleo y gas que soporten la producción de más de 200 mil barriles de petróleo diarios, que desde 1970 no se ha hecho. Países como Arabia Saudita e Irak han anunciado en repetidas ocasiones que su producción no está cerca del declive, aunque la realidad muestra que su producción está en la fase de madurez. En la figura 2 se muestra el decaimiento en los descubrimientos a nivel mundial (Ferrari, 2013).

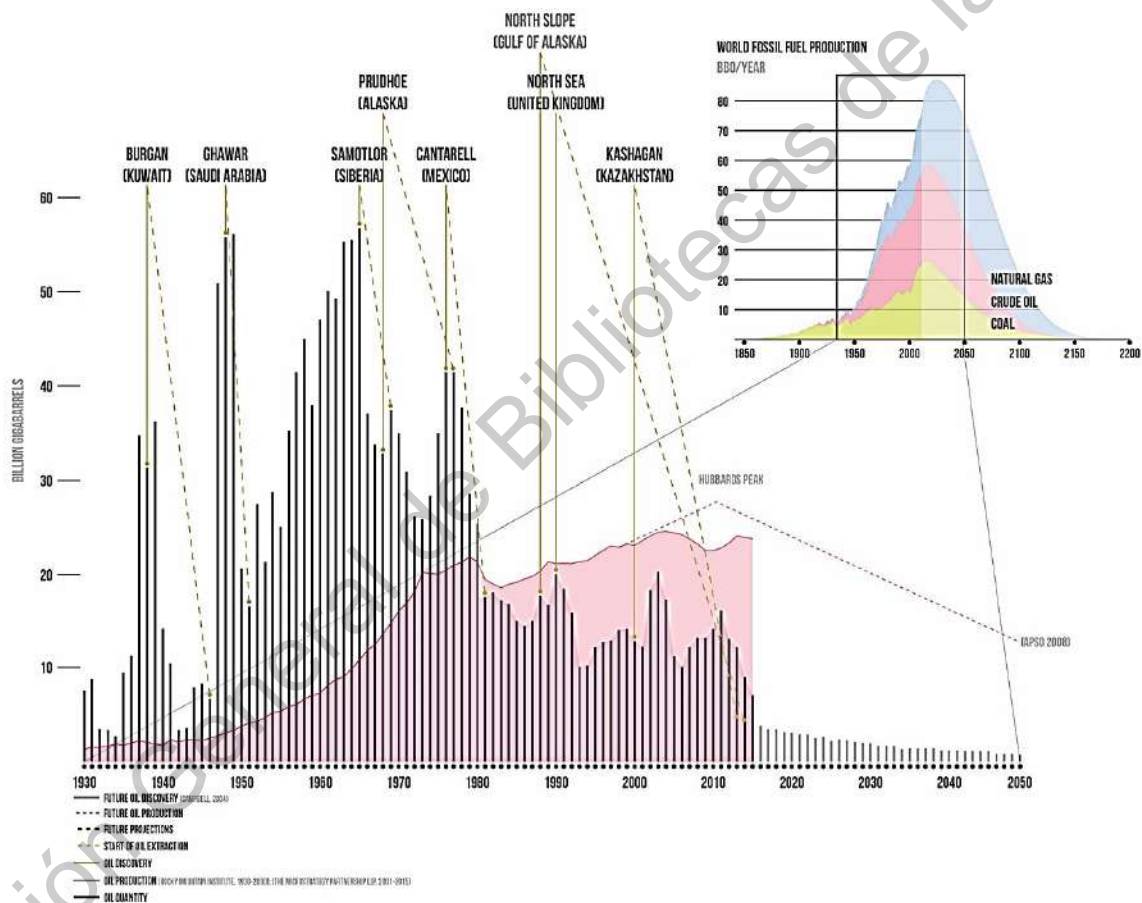


Figura 2. Descubrimientos mundiales de petróleo. La gráfica superpuesta indica el pico de Hubbert (Smith, 2020).

Otro factor importante para analizar es la Tasa de Retorno Energético (EROI por sus siglas en inglés) que depende de la calidad del petróleo. Esta indica el costo energético de la producción desligada a su costo económico, cualquier fuente

energética requiere de más energía para producirse. Se considera rentable cuando  $EROI \gg 1$  (siendo muy rentable económicamente cuando los valores se sitúan cercanos a 10) (Hall et al., 2014). En términos de petróleo, indica cuántos barriles de este combustible se producen por cada barril utilizado para extraerlo. Este valor era de 100:1 en 1930, aunque ha caído hasta 5:1 en algunos lugares, como se observa en la figura 3 (Murphy et al., 2011).

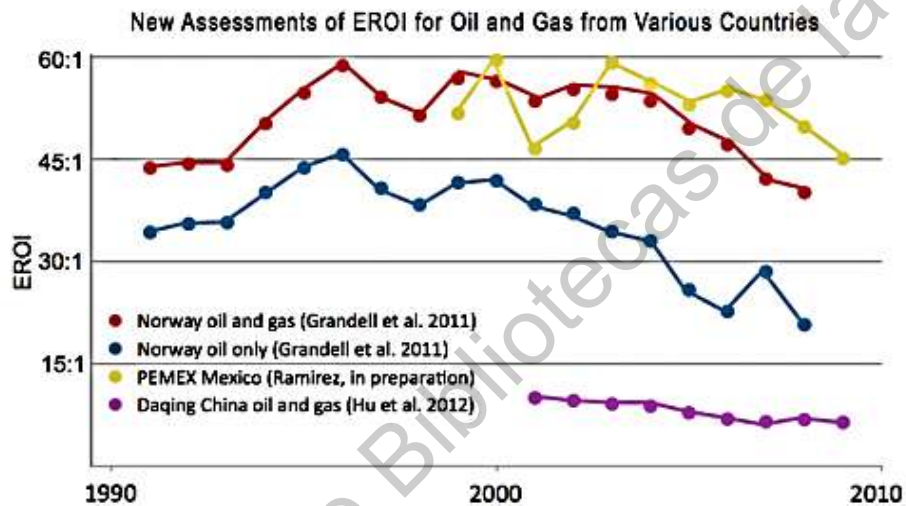


Figura 3. Valores EROI de gas y petróleo en algunos países durante el período 1990-2010 (Hall et al., 2014).

Este escenario ha provocado que se exploren técnicas no convencionales de extracción de petróleo, las cuales se pueden dividir en cuatro: 1) *Deep water oil*, 2) *Tight oil and shale gas*, 3) *Heavy oil*, 4) arenas bituminosas y 5) *Microbial Enhancement Recovery Oil* (MEOR). Organizaciones petroleras han pregonado que estas tecnologías retrasarán en algunas décadas el pico de Hubbert, aunque la realidad muestra que éstas son mucho más caras, de baja tasa de extracción y baja EROI, por lo que no se les puede confiar como una solución a largo plazo, se ha entrado a la era del petróleo difícil (Al-Sulaimani et al., 2011).

Analizando la situación en México, el panorama se torna aún más dramático: Nuestro país depende en un 87.2 % de los hidrocarburos como energía primaria. En 2013, se aprobó una reforma constitucional con un nuevo marco jurídico en

materia energética con la que se pretende disminuir la dependencia de combustibles fósiles con una transición hacia energías limpias (Social Watch, 2016). En producción petrolífera, México depende en gran medida del pozo de Cantarell, el cual alcanzó su pico de producción en 2004, llegando a ser el segundo en el mundo, por detrás de Ghawar en Arabia Saudita, cuando llegó a los 2 millones de barriles diarios. Para 2017, se calcula que ésta ha disminuido a 800 mil barriles diarios y disminuirá con los años pese a los esfuerzos de integrar técnicas de extracción terciaria en el pozo. Esto ha provocado una caída en el EROI y aumento de precios de los hidrocarburos. Aunque México ha explorado otras opciones de producción entre las que se incluye arenas bituminosas, exploración de otros pozos y extracción de petróleo de aguas profundas, ninguna es considerada suficientemente viable tanto económica como tecnológicamente. En el año 2018 fueron descubiertos dos nuevos pozos el golfo de México: Manik 101 A y Mulach, los que tienen una capacidad estimada de producción de alrededor de 200 mil barriles diarios con reservas de 180 millones de barriles; lo cual, sin embargo, sólo hará más lento el declive en la producción, más no lo detendrá, como se observa en la figura 4. (CNH, 2018).

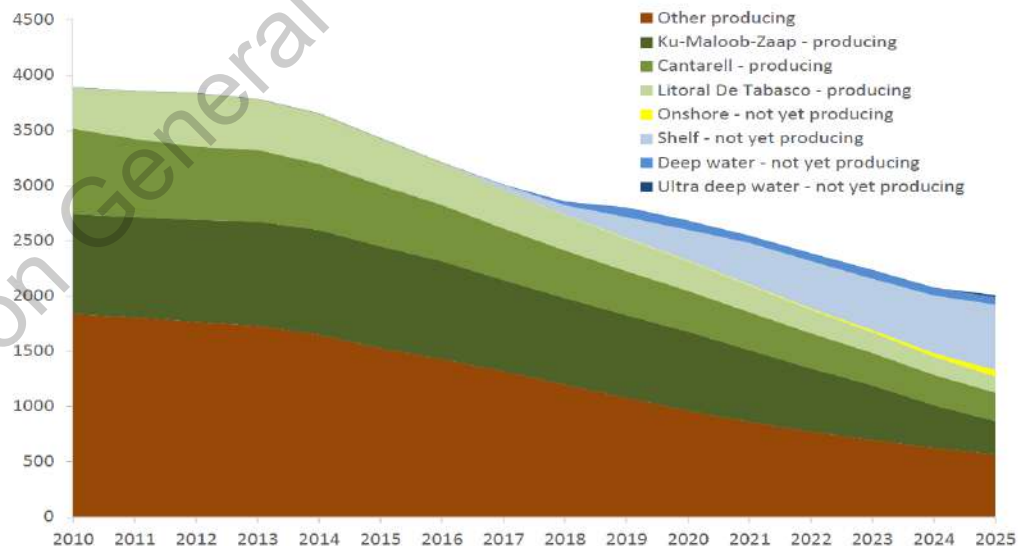


Figura 4. Producción de petróleo en México y proyecciones año por año hasta 2025, en miles de barriles diarios (Kerimova et al., 2016).

Según la “Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más limpios” publicada por el Gobierno Federal de México en enero de 2020 para el sexenio 2018-2024, se busca una transición hacia energías limpias en el país, reduciendo gradualmente la dependencia de los combustibles de origen fósil como fuente de generación primaria. Entre los objetivos que plantea este documento están establecer las metas y rutas para la implementación de las energías limpias, reducir la emisión de contaminantes provenientes de la industria eléctrica y reducir la dependencia de los combustibles fósiles del país como fuente primaria. En la figura 5, se detalla dicha estrategia:

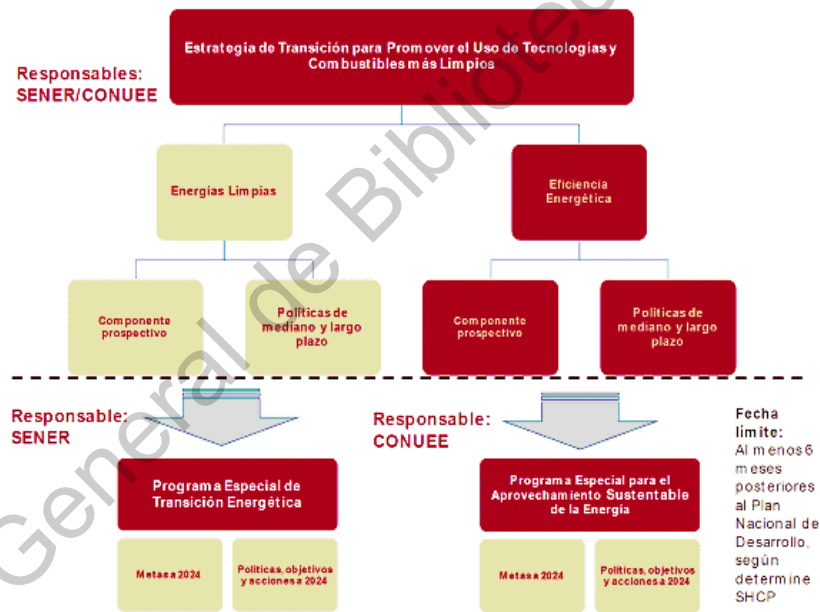


Figura 5. Estrategia Federal de transición hacia energías limpias en México (Ley de Transición Energética, 2020).

Por tanto, y de acuerdo con las necesidades del medio ambiente y el declive en la producción de combustibles fósiles, es de notar que en general en todos los países, incluido el nuestro a través de la Ley General de Cambio Climático y Ley de Transición Energética, derivada de los Acuerdos de París (2015), es de suma

importancia establecer la transición hacia fuentes energéticas alternativas, ecológicamente viables y que puedan satisfacer la creciente demanda energética a nivel mundial.

## 2.2 Biocombustibles como alternativa.

Una de las alternativas más estudiadas durante años ha sido la bioenergía, específicamente los biocombustibles. Su definición, pasa por varios enfoques, pero en todos se llega a la conclusión que constituyen una fuente de bioenergía proveniente de la biomasa. Son neutralizadores de la huella de carbono, porque provienen de medios que fijaron el carbono atmosférico en un período corto de tiempo (Bustamante et al., 2016).

El enfoque histórico-tecnológico, suele ser el más adecuado para su análisis, no hace hincapié en el origen de la materia, sino en su forma de obtención en cierto período de tiempo. Por tanto, se ha dividido a los biocombustibles en cuatro generaciones (Álvarez, 2009).

### 2.2.1 Primera generación

Los insumos están centrados en un origen agrícola y está conformado por las partes alimenticias de las plantas, con un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. También entran las grasas animales y aceites de desecho como los de cocina. La tecnología de obtención es mediante técnicas como fermentación, transesterificación y digestión anaerobia; obteniendo biodiésel, etanol, biogás, butanol. Tiene como ventajas la fácil obtención y bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). La desventaja importante es que los cultivos alimenticios han sido desviados para obtener energía (Ho et al., 2014).

### 2.2.2 Segunda generación

Se usa como insumos a los residuos agrícolas y forestales, compuestos principalmente de celulosa como pajas, aserrín, ramas secas, bagazo, entre otros. La tecnología de obtención es más compleja con ejemplos como la sacarificación - esterificación y el proceso Fischer-Tropsch. Se obtienen biocombustibles como etanol, metanol, gases de síntesis, biodiésel, N,N-dimetilformamida. Su principal ventaja es que no desvía cultivos alimenticios hacia la energía, pero con la desventaja de no disminuir la cantidad de GEI en las cantidades que logran los biocombustibles de primera generación (Cotana et al., 2014).

### 2.2.3 Tercera generación

Los insumos provienen de vegetales no comestibles, de rápido crecimiento y alta densidad energética, denominados “cultivos energéticos”. Entre ellos están los pastos perennes, eucaliptos y álamos bajos en lignina, plantas de rápido crecimiento, plantas adaptadas a condiciones adversas y algas. Las tecnologías aún están en desarrollo, pero se han obtenido productos como etanol y butanol. También la biología sintética cuenta con un papel importante para lograr balances ecológicos positivos y evitar el desplazamiento de los cultivos alimenticios (Singh et al., 2011).

### 2.2.4 Cuarta generación

En esta generación de biocombustibles se utilizan organismos genéticamente modificados en todas las fases del proceso de producción de biocombustibles para generarlos. La clave es la captura de carbono a nivel materia prima y proceso. De este modo el insumo se adapta para mejorar la eficiencia. Combinan procesos termoquímicos y de captación y encauce de dióxido de carbono incluso a los yacimientos petrolíferos agotados. Aún están en fase de investigación en muchos de sus proyectos (Aro, 2016).

El gobierno de México a través de la Secretaría de Energía (SENER) publicó en 2016 “Prospectiva de Energías Renovables 2016 – 2030”, donde maneja el

potencial uso de seis cultivos para la producción de bioenergéticos: palma aceitera, palma de coco, soya, girasol, jatropha e higuera. En este estudio, destaca a las dos últimas categorizadas entre la tercera generación de biocombustibles. Su producción estará enfocada en la obtención de biodiésel. Este mismo plan incluye la producción de biogás, pero mediante heces de animales, bagazo de caña azucarera y pajas (como de maíz, sorgo, trigo, arroz, entre otros).

### 2.3 Panorama socioeconómico de México

La pobreza es uno de los problemas más comunes en México. Está definida por el CONEVAL (2016) como: *“Una persona se encuentra en situación de pobreza cuando tiene al menos una carencia social (en los seis indicadores de rezago educativo, acceso a servicios de salud, acceso a la seguridad social, calidad y espacios de la vivienda, servicios básicos en la vivienda y acceso a la alimentación) y su ingreso es insuficiente para adquirir los bienes y servicios que requiere para satisfacer sus necesidades alimentarias y no alimentarias”*. Minor y Lima (2012), clasifican la pobreza en dos: extrema y moderada. La pobreza moderada es cuando se cuentan con hasta dos. La pobreza extrema es cuando una persona tiene tres o más carencias de las seis posibles antes mencionadas.

En 2016, el CONEVAL, realizó un estudio que develó que en México 53.4 millones de personas entran dentro de la categoría de pobreza, equivalente al 43.6% del total poblacional del país. De ellos, se estima que 9.4 millones (7.6%) entran en la categoría de pobreza extrema.

Uno de los problemas más comunes es la falta de servicios básicos de vivienda. Esto es según CONAVI (Consejo Nacional de Vivienda) de acuerdo con el artículo 4° constitucional, presentar alguna de las siguientes características: falta de agua entubada, no tener servicio de drenaje, no disponen de energía eléctrica y el combustible para cocinar es leña o carbón sin chimenea.

Para 2017, se estimó que en México el 20% de los hogares utilizaban leña para cocinar sus alimentos y calentar sus hogares, la mayor parte se localiza en áreas



rurales, lo que hace que estén potencialmente expuestos a las sustancias tóxicas que contiene el humo de leña. La figura 6 muestra más a detalle el uso de leña en México (COFEPRIS, 2017).

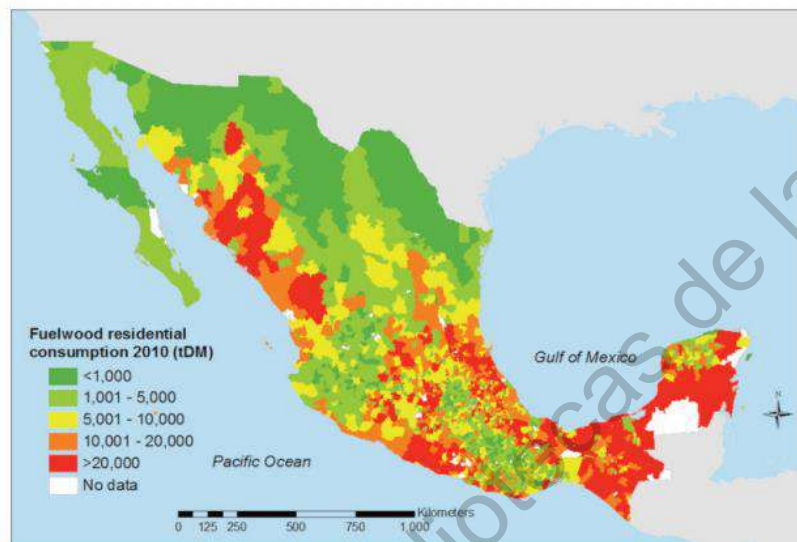


Figura 6. Usuario de leña por municipio en México (Serrano et al., 2018).

Esto acarrea problemas de salud como infecciones agudas de las vías respiratorias en niños, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), bronquitis, enfisema y cáncer pulmonar, debido a que normalmente no se tiene la ventilación adecuada en los lugares donde se queman, además de las sustancias inherentes a la quema de leña que son: dióxido de carbono, monóxido de carbono, butadieno, benceno, formaldehído, hidrocarburos poliaromáticos y otros compuestos menores. La Organización Mundial de la Salud estima cerca de 2.4 millones de muertes prematuras a nivel mundial por quema de leña sin ventilación adecuada en los hogares. Esto sin contar los efectos ambientales por la emisión de gases de efecto invernadero y tala ilegal de bosques, que eliminan servicios ambientales básicos e incluso ecosistemas enteros: se estima que en México la cantidad de leña extraída de manera ilegal es siete veces mayor que la legal (Sánchez, 2011; Smith, 2013). Por ello se ha propuesto la adopción de fogones que utilicen biogás como combustible, son seguros de utilizar e instalar y sus emisiones a la atmósfera son

mucho más bajas, como se observa en la figura 7. Así el biogás surge como alternativa energética que pretende disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y la carencia de una fuente energética viable sobre todo en hogares con carencia de servicios básicos (CEC, 2018).

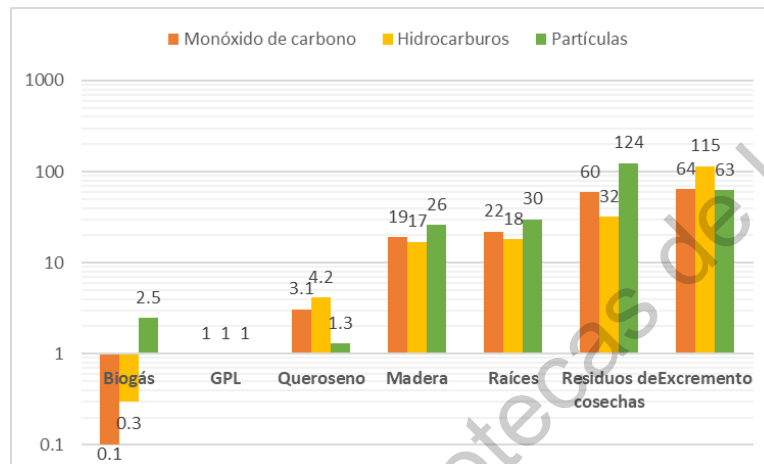


Figura 7. Emisiones contaminantes según el combustible utilizado para cocinar en relación con el Gas Licuado de Petróleo (GPL=1.0) (Smith et al., 2013).

## 2.4 Biogás

El biogás es un gas combustible obtenido a partir de la biomasa, siendo utilizado para generar energía eléctrica y calorífica. Conformado principalmente por mezclas de metano (50 -70 %) y dióxido de carbono (25-40 %) con una pequeña cantidad de ácido sulfhídrico, su composición varía de acuerdo al material orgánico utilizado y condiciones de operación de los reactores, sin embargo, los rangos aproximados de composición se detallan en el cuadro 1 (REMBIO, 2019). El valor calorífico va de 20 a 30 MJ por m<sup>3</sup> de gas, de acuerdo a la cantidad de dióxido de carbono contenido (a mayor cantidad, menor poder calorífico). El biogás se encuentra por debajo de los combustibles fósiles en cuanto a cantidad de CO<sub>2</sub> producido, por lo que es una opción más limpia que éstos (Hill, 2011).

Cuadro 1. Composición química del biogás.

Componente	Concentración
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-70 % (en volumen)
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25-40 % (en volumen)
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	2-7 % (en volumen)
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	20 ppm – 20000 ppm
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	<2 % (en volumen)
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	<2 % (en volumen)
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	<1 % (en volumen)

FUENTE: REMBIO, 2019.

#### 2.4.1 Etapas de formación del biogás

El biogás se forma mediante un proceso bioquímico llamado digestión anaerobia. El modelo de análisis por etapas que describe el proceso es llamado ADM 1 y fue diseñado por la IWA (Asociación Internacional del Agua por sus siglas en inglés) y es el más ampliamente utilizado, consta de 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; descritas más a detalle a continuación y resumida en la figura 8 (FAO, 2019).

##### 2.4.1.1 Hidrólisis

Es la primera etapa de los procesos de digestión anaerobia e involucra la transformación de moléculas orgánicas grandes y complejas en moléculas más pequeñas y solubles, para de esta manera ser absorbidas por los microorganismos como sustrato. Esta etapa es el paso limitante de la digestión anaeróbica y es llevada a cabo por anaerobios estrictos como *Bacterioides* y *Clostridium* y bacterias facultativas como *Streptococcus*. La velocidad de esta reacción depende de la naturaleza del sustrato. La transformación de la celulosa y hemicelulosa es más lenta que la de proteínas. Para realizar la hidrólisis, los microorganismos secretan

enzimas extracelulares que degradan las moléculas complejas para que éstos puedan aprovecharla como fuente de alimento. Los microorganismos que rompen azúcares son llamados “sacarolíticos” mientras que los que degradan proteínas, “proteolíticos” (Cazier et al., 2015; Adekunlie y Oklie, 2015).

#### 2.4.1.2 Etapa acidogénica o fermentativa

Los monómeros producidos durante la etapa hidrolítica son transformados a ácidos orgánicos de cadena corta como butírico, propiónico y acético, además de compuestos como hidrógeno y dióxido de carbono. La concentración de hidrógeno influye en el producto final durante el proceso de fermentación. En general, durante esta fase, azúcares simples, ácidos grasos y aminoácidos son convertidos en alcoholes y ácidos orgánicos (Corrales et al., 2015).

#### 2.4.1.3 Etapa acetogénica

Los productos de la etapa anterior son consumidos por los microorganismos. Aquellos que no pueden ser aprovechados para ser convertidos directamente en metano, son convertidos en sustratos metanogénicos, ácidos grasos volátiles y alcoholes que son oxidados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Los microorganismos oxidadores colaboran con los formadores de metano a una baja presión de gas hidrógeno para seguir produciendo los sustratos (Adekunle y Okolie, 2015).

#### 2.4.1.4 Etapa metanogénica

La producción de metano y dióxido de carbono se lleva a cabo por bacterias metanogénicas bajo condiciones anaeróbicas estrictas. Es el paso crítico en todo el proceso, ya que es la reacción bioquímica más lenta. El acetato, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados en metano por dos procesos distintos. En el primero, organismos metanogénicos acetoclásicos utilizan acetato como sustrato. En el

segundo, los organismos hidrogenotróficos consumen hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano. Los organismos de esta etapa tienen un crecimiento lento, por lo que su metabolismo es un limitante (Cazier et al., 2015; Gonzales et al., 2015).

Cabe destacar, que actúan diferentes consorcios bacterianos en cada una de las etapas. En las primeras dos fases participan al menos 18 géneros y 58 especies, siendo *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Eubacterium* y *Bacteroides* los principales. En la tercera y cuarta etapa se han identificado 23 géneros y 81 especies, destacando los órdenes de arqueas metanógenas y los géneros *Acetobacter* y *Eubacterium* (Corrales et al., 2015).

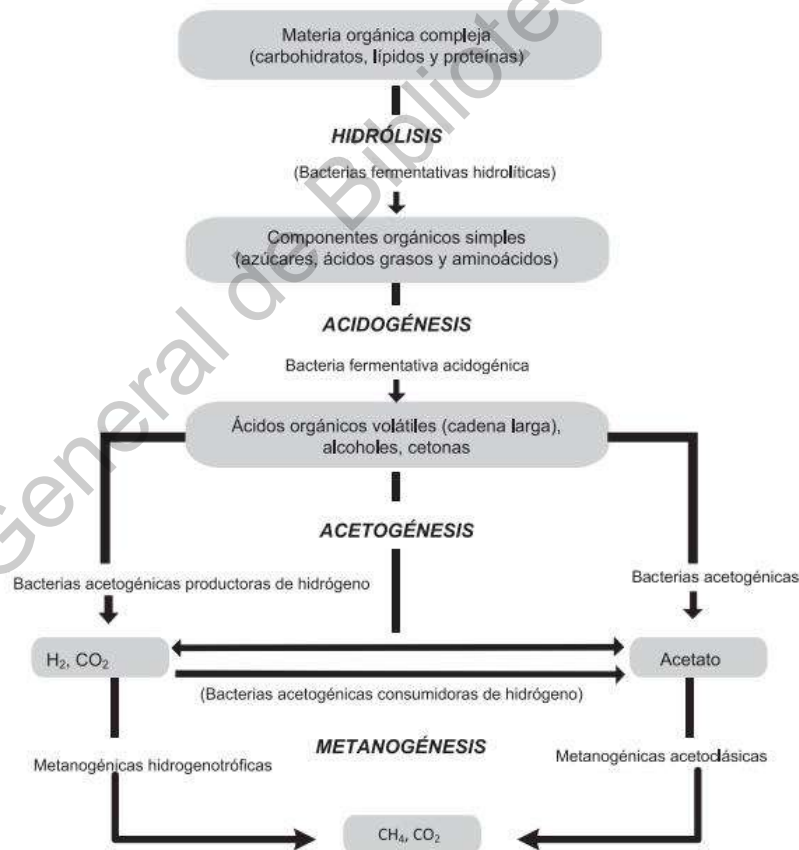


Figura 8. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos y grupos de bacterias que intervienen en cada etapa del proceso (Moraes et al., 2015).

## 2.5 Factores que influyen en la producción de biogás.

Los procesos biológicos requieren de ciertos parámetros para llevarse a cabo u optimizar el proceso. La producción de biogás mediante fermentación anaerobia requiere de condiciones específicas para alcanzar el óptimo en la cinética y cantidad de producción. A continuación, se enlistan los factores críticos para la producción de biogás:

### 2.5.1 Tipo de materia prima

La degradación de la materia orgánica es complicada de tratar a detalle, por lo que, simplificando, las fuentes carbonatadas más utilizadas por los organismos que participan en la producción de biogás son los carbohidratos, sobre todo las hexosas, como se puede ver en el cuadro 2 (Vera et al., 2017). Las materias primas fermentables incluyen a las excretas animales, desechos vegetales, aguas residuales industriales, restos de cosechas, basuras de distintos tipos, entre otros. La materia con un alto contenido de lignina no es aprovechable directamente y por tanto debe someterse a tratamientos previos a fin de liberar las sustancias aprovechables para la fermentación anaerobia. En cuanto al estiércol animal, depende fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación recibida. (FAO, 2019; Reyes, 2017).

Cuadro 2. Producción y composición teórica de biogás para diversos compuestos orgánicos.

<b>Compuesto orgánico</b>	<b>Biogás</b> m <sup>3</sup> /kg SV	<b>CH<sub>4</sub></b> m <sup>3</sup> /kg ST
Carbohidratos	0.75	0.37
Lípidos	1.44	1.44
Proteínas	0.98	0.49

FUENTE: Varnero y Arellano, 1991.

Las moléculas obtenidas dan lugar a los procesos biológicos de los microorganismos y las oxidaciones o reducciones del medio; si este es rico en oxígeno, se da una mineralización total del carbono con su respectiva liberación de energía equivalente. Si es más bien anaerobio se da lugar a procesos de reducción biológica o fermentaciones. Además, dependiendo del tipo de fermentación, se desprenden otros gases como metano e hidrógeno. Por tanto, dependiendo del tipo de materia orgánica, se obtendrán distintas dinámicas y cantidades de biogás (FAO, 2011). En los cuadros 3 y 4 se muestra la producción promedio de biogás de diversos residuos animales y vegetales, respectivamente.

Cuadro 3. Producción de biogás por tipo de residuo animal.

Tipo de estiércol	Disponibilidad kg/día	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m <sup>3</sup> /kg húmedo	m <sup>3</sup> /día/año
Bovino	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino	10.00	50:1	0.04	0.400
Cunícula	0.35	13:1	0.06	0.021
Humano	0.40	3:1	0.06	0.025

FUENTE: Varnero y Arellano, 1991.

Cuadro 4. Producción de biogás por tipo de residuo vegetal.

Tipo de residuo	Cantidad de residuo ton/ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m <sup>3</sup> /ton	m <sup>3</sup> /ha
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Cebada	3.6	95:1	388	1400
Arroz	4.0	58:1	352	1400
Papa	10.0	20:1	606	6000
Betabel	12.0	23:1	501	6000
Frijol	3.2	38:1	518	1650
Haba	4.0	29:1	608	1400
Tomate	5.5	12:1	603	3300
Cebolla	7.0	15:1	514	3600

FUENTE: Varnero y Arellano, 1991.

### 2.5.2 Temperatura.

Es uno de los parámetros más importantes en cualquier proceso bioquímico, inhibe o ayuda a desarrollar a diferentes grupos de bacterias, debido a que implican la producción de enzimas y éstas a su vez son sensibles a la temperatura. También influye en los tiempos de activación, ya que los organismos actúan en tiempos óptimos dependiendo de la temperatura (Parra, 2015).

La biodigestión anaerobia puede ocurrir en procesos que van desde 5 a 60 °C. Aumentos de pocos grados en la temperatura no provocan un efecto negativo en las bacterias metanogénicas, caso contrario si decae, ya que puede retrasar la producción de metano. Las bacterias de la fase acidogénica se ven mínimamente afectadas por este factor, por lo que se siguen produciendo ácidos, con ello viene un decaimiento en el pH e inestabilidad en el reactor (Reyes, 2017).



Existen tres clasificaciones en que se llevan a cabo la fermentación anaerobia de acuerdo a la temperatura: psicrófila, con rangos de temperatura que van de los 5 a 20 °C; mesófila, de 20 a 40 °C; y termófila, 40 a 60 °C. Los más estables y estudiados son los grupos mesofílicos, poseen la característica de trabajar a temperatura ambiente o cercana. En cuanto a los grupos psicrófilos, son estables, pero son mucho más lentos en la producción de metano. Finalmente, los procesos termofílicos presentan ventajas como mejor aprovechamiento de la materia prima, mayor higienización del gas producido y más rapidez, aunque también son muy inestables y hay alta producción de nitrógeno amoniacal (inhibe la actividad bacteriana) (Gallert et al., 1998). Un resumen del factor temperatura se presenta el cuadro 5:

Cuadro 5. Rangos de temperatura y tiempos óptimos de digestión anaerobia.

<b>Tipo de fermentación</b>	<b>Temperatura mínima (°C)</b>	<b>Temperatura óptima (°C)</b>	<b>Temperatura máxima (°C)</b>	<b>Tiempo de fermentación (días)</b>
Psicrófila	4-10	15-18	20-25	<100
Mesófila	15-20	25-35	35-45	30-60
Termófila	25-45	50-60	75-80	10-15

FUENTE: Reyes, 2017.

### 2.5.3 Acidez en el sistema: pH.

Los microorganismos que participan en el proceso de obtención de biogás, son altamente sensibles al pH, debiéndose mantener en valores cercanos a la neutralidad (pH = 7) pero con una tolerancia a un rango entre 6 y 8.5. La forma en que el pH influye en el sistema puede resumirse en lo siguiente:

Alteración en los grupos hidrolizables de las enzimas: carboxil y amino.

Cambio en los componentes no ionizables, por ejemplo, la desnaturalización proteica de las enzimas.

Cabe resaltar que el valor del pH varía desde el inicio y hasta el final de la biodigestión, dependiendo de la fase en que se encuentre y de la naturaleza de los sustratos utilizados, sin embargo, una vez estabilizado el proceso, se mantiene entre los valores de pH antes mencionados. Cuando está por debajo o encima, se corre el riesgo de inhibir o detener por completo el proceso. Sin embargo, debido al efecto buffer de los compuestos dióxido de carbono – bicarbonato y amonio – amoniacal, el proceso posee cierta capacidad de regularse por sí mismo. Cuando el pH tiene un valor alto, se puede corregir extrayendo un poco del efluente y agregando materia orgánica fresca. Caso contrario, el pH se puede aumentar agregando agua amoniacal diluida, cenizas o fertilizante (Kondusamy y Kalahmad, 2015; Reyes, 2017).

#### 2.5.4 Relación Carbono – Nitrógeno (C/N).

Toda la materia orgánica tiene la capacidad por sí misma de producir biogás, debido a la degradación natural de los microorganismos. Sin embargo, la cantidad y sobre todo la calidad (es decir, un alto porcentaje de metano) dependen de la composición y naturaleza del residuo, debido a que las bacterias productoras de metano se inhiben ante la falta de nutrientes.

La relación carbono – nitrógeno es el cociente entre la cantidad de carbono y la cantidad de nitrógeno presente en una materia prima y se expresa como una proporcionalidad (FAO, 2011):

$$K = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots + C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots + N_nQ_n}$$

K= C/N de la mezcla de los sustratos.

C: Porcentaje de carbono orgánico contenido en cada sustrato.

N: Porcentaje de nitrógeno total en cada sustrato.

Q: Peso fresco de cada sustrato, expresado en kg o ton.

### 2.5.5 Contenido de sólidos

La cantidad de sólidos es la cantidad de materia en peso seco total que hay en el reactor disponible para que las bacterias la conviertan en biogás. Una gran cantidad de materia no sería posible de procesar por las bacterias presentes conllevando a que no se aproveche el total de esta. Estudios acerca de esto demostraron que un 10% de sólidos totales es la cantidad adecuada de material en un biorreactor (Mao et al., 2015).

### 2.5.6 Nutrientes

Los organismos requieren de macronutrientes, tales como el potasio y el nitrógeno, así como micronutrientes (minerales traza como sodio, magnesio, calcio, etc.), para llevar a cabo sus funciones vitales. Los procesos anaerobios requieren de una menor cantidad de nutrientes en el medio que los aeróbicos. Se requiere aproximadamente 12 g de nitrógeno por 100 g de biomasa anaeróbica para el correcto funcionamiento del sistema. Se ha encontrado que también la presencia de minerales traza como magnesio, cobalto, calcio, hierro, tungsteno, níquel, zinc entre otros en cantidades de partes por millón, mejoran la producción de metano (Parra, 2015).

### 2.5.7 Potencial redox

El potencial se debe de mantener en un rango de -220 a -350 mV en un pH neutro (7.0) para asegurar un ambiente fuertemente reductor en el medio que ayude a que las bacterias tengan un desarrollo y funcionamiento adecuado. Se recomienda añadir sulfuro, cisteína o titanio (III) para mantener el potencial redox recomendado en el sistema metanogénico (FAO, 2019).

## 2.6 Biodigestores o biorreactores.

Son contenedores herméticamente cerrados donde se llevan a cabo reacciones químicas, en este caso la transformación de biomasa en biogás, denominada digestión anaeróbica. Un esquema general es mostrado en la figura 9. Las partes que lo componen son las siguientes (FAO, 2020):

- **Reactor:** Es el contenedor donde ocurren las reacciones del proceso bajo condiciones específicas y/o controladas. Su forma es variable: puede ser circular, rectangular, triangular entre otras formas geométricas y construido de diferentes materiales, dependiendo del tipo de biomasa que se quiera utilizar, pero en este caso, normalmente están constituidos de polímeros tales como PET, HDPE, entre otros. Tienen cubiertas para proteger el material, mantener la temperatura, impedir el escape de olores y conservar el gas para ser recogido.
- **Sistema de carga:** La manera de ingresar la biomasa en el reactor depende del biodigestor utilizado, el sustrato y sus condiciones.
- **Puntos de toma de muestra:** Se ubican a lo largo del biorreactor con el fin de obtener muestras representativas para que, durante el seguimiento de los parámetros de la obtención de biogás, éstos se encuentren dentro de los rangos deseados.
- **Salida del biodigerido:** Las tuberías de extracción permiten que la muestra ya procesada salga del reactor para su adecuada disposición.
- **Sistema de biogás:** Se encarga de la colección, traslado y acondicionamiento del biogás en los puntos de consumo para sus aplicaciones térmicas o eléctricas.

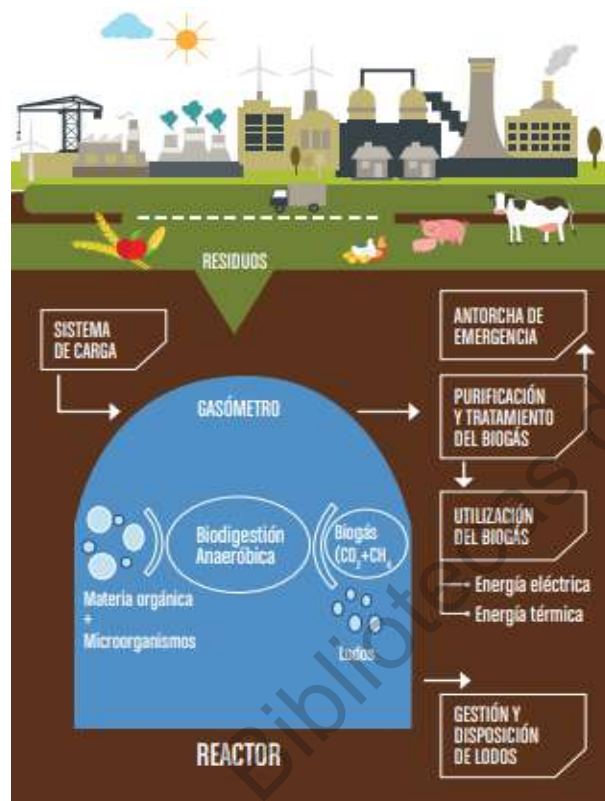


Figura 9. Diagrama general de un biodigestor anaerobio para la generación de biogás a partir de biomasa (FAO, 2020).

### 2.6.1 Variables que se consideran en el diseño de un biodigestor.

En el proceso se deben de considerar algunas variables para el correcto funcionamiento del biorreactor, las cuáles son (IDAE y Besel, 2007):

- **Alimentación:** continua o por lotes (batch).
- **Tipo de sustrato:** residuos agrícolas, ganaderos, agroindustriales, urbanos.
- **Disponibilidad de biomasa:** por generación propia o adquirida de terceros.
- **Con o sin pretratamiento del sustrato.**
- **Con o sin agitación:** influye en la eficiencia de la planta y en los inconvenientes por sedimentación o flotación de sustrato.

- **Con o sin sistema de calentamiento:** sirve para controlar la temperatura y con ello la actividad biológica dentro del reactor.
- **Aplicación del biogás:** generación de energía eléctrica en motogeneradores, generación de energía térmica o de energía calorífica. Influye en el diseño del sistema del biogás y su tratamiento.

#### 2.6.2 Tipos de biodigestores utilizados para biogás.

La cantidad de biorreactores es amplia y la lista se sigue incrementando a medida que la tecnología en la producción de biogás avanza y se adapta a diferentes entornos en los lugares en que se está implementando, principalmente rurales. Sin embargo, hay 4 tipos que destacan del resto por su utilidad, bajo costo, amplio estudio y un mantenimiento relativamente sencillo, así como un esquema correspondiente a cada tipo de biorreactor (FAO, 2020):

- **Mezcla completa:**

Este tipo de reactores pueden dividirse a su vez en los que cuentan con recirculación y los que no. Ambos tienen en común su uso para efluentes de residuos con una cantidad de sólidos totales entre 3 y 20 % así como la simpleza de su diseño (IDAE y Besel, 2007):

- Mezcla completa sin recirculación:

Mantiene una cantidad constante de residuos y microorganismos en el reactor. Cuentan con un sistema de agitación, para mantener uniforme las concentraciones en el reactor, el cual puede ser mecánico, neumático o manual. El tiempo de retención es alto en comparación con otro tipo de reactores. Al mantener una concentración constante de la especie dentro del reactor, la velocidad de reacción disminuye y se compensa con un tiempo de retención alto para producir biogás.

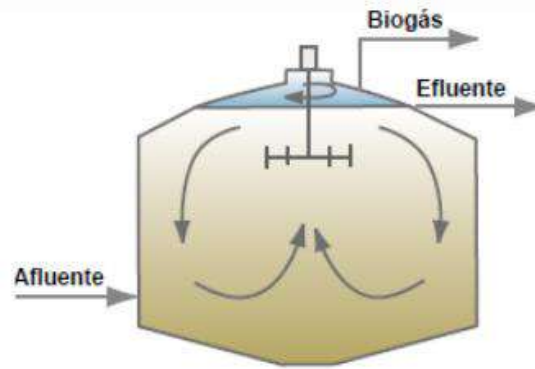


Figura 10. Esquema de un biorreactor de mezcla completa sin recirculación (IDAE y Besel, 2007).

- Mezcla completa con recirculación:

Se conoce como reactor anaeróbico de contacto y es el mismo que el sistema de recirculación de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales. En este tipo de reactor, disminuye el tiempo de retención en el reactor debido a que los microorganismos se aíslan en un decantador, esto aumenta su tiempo y concentración en el reactor, disminuyendo con ello el tiempo de obtención de biogás. Es utilizado en efluentes con una alta cantidad de residuos orgánicos.

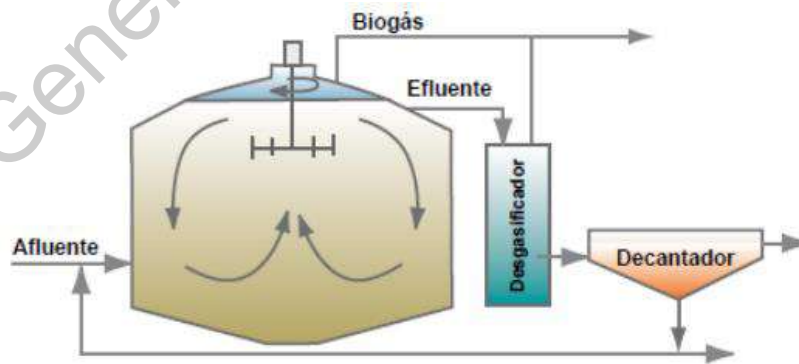


Figura 11. Esquema de un biorreactor de mezcla completa con recirculación (IDAE y Besel, 2007).

- **Flujo pistón:**

Son reactores rectangulares o cilíndricos. Tiene una circulación de sustrato y mezcla en digestión muy parecida a la de un pistón cuando se alimenta, de ahí su nombre (Escalante et al., 2017).

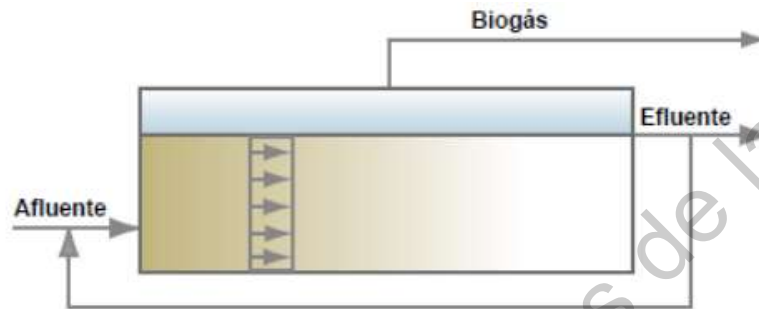


Figura 12. Esquema de un biorreactor de flujo pistón (IDAE y Besel, 2007).

- **Reactores anaeróbicos de contacto (RAC):**

Son utilizados para grandes caudales de afluente con una carga orgánica media, por los que ocupan amplias dimensiones. Son piletas escalonadas, cubiertas de geomembranas, que otorgan flexibilidad y hermeticidad al techo para la acumulación del biogás. Las tuberías de alimentación direccionan al flujo dentro del reactor para lograr el mayor contacto con los lodos activados (Azeredo et al., 2020).

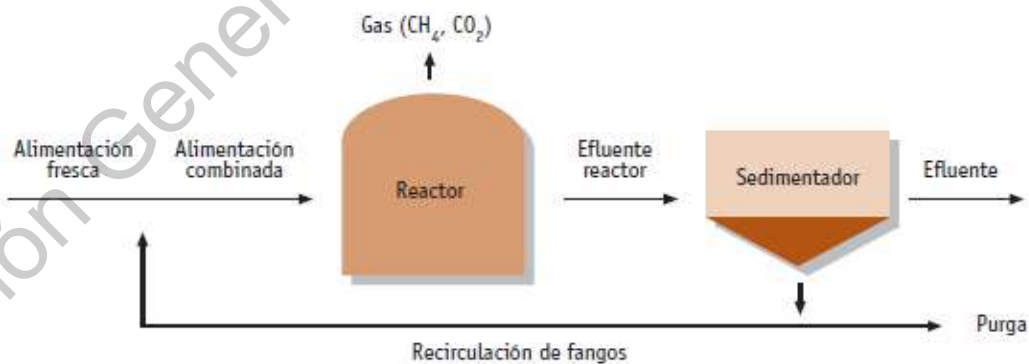


Figura 13. Esquema de un biorreactor anaeróbico de contacto (Portales, 2011).



- **Reactores de flujo ascendente y manto de lodos (UASB):**

Son los reactores que tienen un mayor desarrollo de ingeniería y complejidad de operación. El sustrato asciende a través de un manto granular de lodos suspendidos, logrando de esta manera una mayor área de contacto con el sustrato, lo que permite reducir las dimensiones del reactor y de la alimentación. La parte superior del reactor, con forma cónica, logra separar el gas y evitar la mezcla con los otros fluidos del biorreactor. Estas instalaciones cuentan con un alto grado de automatización y control para poder operar el proceso de manera eficiente. Particularmente efectivo en sustratos con un alto contenido de líquidos (Azeredo et al., 2020).

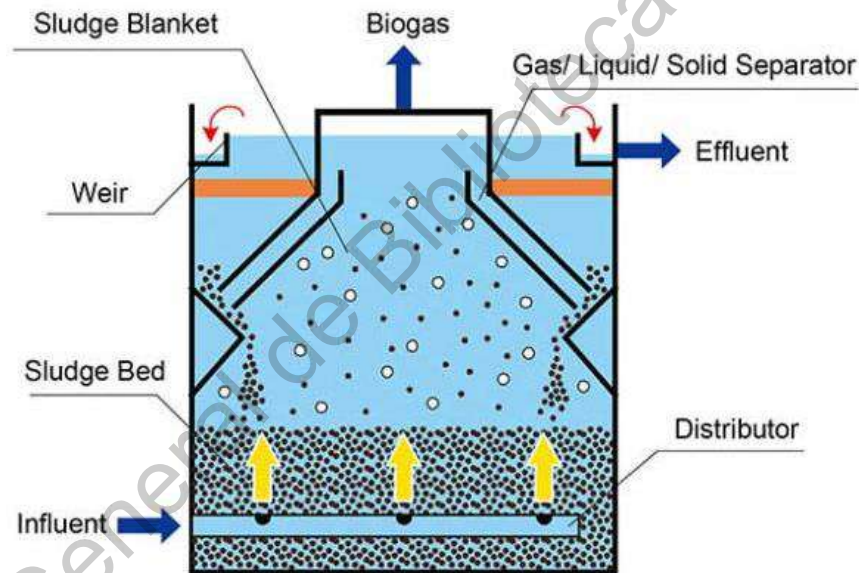


Figura 14. Esquema de un reactor UASB (ITRI, 2019).

Se pueden utilizar distintas fuentes de alimentación como materia prima para la producción de biogás, entre ellas está la llamada higuera (*Ricinus communis*).

## 2.7 Biogás a partir de bagazo.

Una de las fuentes potenciales para producir biogás, pero aún muy poco explorada es el bagazo de las distintas especies de cultivos energéticos. En la mayoría de los

casos, se aprovecha la planta para producir biocombustibles como etanol y biodiésel, pero el bagazo, definido como “el residuo lignocelulósico, fibroso, obtenido después de extraer el jugo o aceite de una planta y/o semilla”, es normalmente utilizado como alimento para ganado o compostaje; llegando incluso en la mayoría de los casos a tiraderos o rellenos sanitarios, también se usa como combustible (SENER, 2016).

Se han estudiado diferentes bagazos provenientes de cultivos energéticos para la obtención de biogás teniendo como resultado lo siguiente:

En el 2007, Isci y Demirer realizaron un trabajo donde se trató el bagazo de semilla de algodón después de extraer su aceite. En un período de 23 días obtuvieron 78 mL de gas por cada gramo de bagazo, con un tiempo de adaptación de 5 a 10 días y agregando un “tratamiento basal” que consistió en una mezcla de algunos nutrientes y trazas de compuestos metálicos para mejor desarrollo de las bacterias metanogénicas. Luo y col. (2011) evaluaron la producción con bagazo de canola generando 378 mL de gas por gramo de sólidos totales (TS), sin evaluar su composición. En 2012, Raheman y Mondal probaron diferentes concentraciones de *Jatropha curcas* mezclada con heces de vaca y paja de arroz, teniendo máximos rendimientos en 20 % de sólidos totales de *J. curcas* y 0.17 m<sup>3</sup> de biogás así como relaciones C/N entre 22:1 y 27:1, comparado a los 0.166 m<sup>3</sup> obtenidos utilizando sólo heces de vaca. Por otro lado, Gupta y col. (2012) usaron *Madhuca indica* tratada previamente para eliminar las toxinas que contiene su bagazo, para obtener biogás en mezclas con estiércol vacuno. El mayor rendimiento fue usando una relación de sólidos totales compuesta de 50 % (v/v) de *M. indica* y el otro 50% de estiércol; con un total de 442 L·kg<sup>-1</sup> de sólidos totales y 58-60% de metano. Chandra y col., difundieron también en 2012 un experimento donde probaron con bagazo de semilla obtenido de extraer aceite de las especies *J. curcas* y *Pongamia pinnata*, poniéndolo en digestión anaerobia por 30 días. Obtuvieron un promedio de 394 L·kg<sup>-1</sup> TS y 66.6% en contenido de metano así como 31.3% de dióxido de carbono para *J. curcas*. En el caso de *P. pinnata*, el rendimiento fue 427 L·kg<sup>-1</sup> TS y 62.5% en contenido metánico y 33.5% en CO<sub>2</sub>. En 2015, Barik y Murugan probaron con

bagazo de semilla de *P. pinnata* mezclado con estiércol vacuno en cuatro distintos tratamientos. El mejor rendimiento fue con un 25 % de bagazo ( $5.267 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ TS}$ ), relación C/N de 24:1 y contenido en volumen de 73 % metano y 17 % dióxido de carbono; rendimiento diez veces superior comparado con las heces de vaca, el cual fue  $0.533 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ TS}$ , 60 % metano por 30 % dióxido de carbono y 21.76:1 en relación C/N. En 2015, Jablonski y col., produjeron biogás a partir de bagazo de canola. Sus resultados indicaron un tiempo de adaptación de 3 a 7 días, un rendimiento promedio de  $0.42 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1} \text{ TS}$  y un máximo de 50% en contenido de metano. Bateni y Karimi utilizaron pasta de semillas de *Eruca sativa*, en 2016. Agregaron un inóculo de 20 mL, proveniente de una planta de aguas residuales, dejando el biorreactor en una incubadora a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  por 45 días. Los niveles del experimento con *E. sativa* contuvieron en uno al bagazo sin tratar, y cuatro restantes con pasta de semilla tratada con hidróxido de sodio diluido a diferentes temperaturas. El rendimiento para el bagazo sin pretratar fue de  $206.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1} \text{ TS}$  y para los pretratados su mejor rendimiento se ubicó cuando el bagazo se dispuso en NaOH a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  por 30 min. con un resultado de  $155.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1} \text{ TS}$ . También en 2016, Petrozzi y col., probaron con bagazo de semillas de *Silybum marianum* en mezclas con estiércol vacuno puestos en una planta piloto comunitaria a temperatura ambiente por 30 días. Los tiempos de adaptación fueron de 12 a 13 días, con relación C/N de 20.1:1. No se sacó el rendimiento por limitaciones en los equipos de medición utilizados. Jablonski y col., pretataron bagazo de *J. curcas* con HCl y NaCl a distintas temperaturas en el 2016. Los resultados indicaron que los pretratamientos no fueron lo suficientemente buenos, provocaron la caída en la eficiencia hasta en un 59% por la presencia de amoníaco. Su mayor rendimiento fue  $0.281 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1} \text{ TS}$  con NaCl a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Finalmente en 2018, Lins y col., usaron bagazo de *Moringa oleifera* obteniendo un máximo de  $2170 \text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$  de gas cuyo contenido de metano fue 7.2 % cuando la concentración fue 10 % TS de bagazo.

Uno de los cultivos energéticos más extendidos, como lo es *R. communis*, sólo cuenta con dos trabajos acerca de la obtención de biogás mediante su bagazo. En 2014, Bateni y col., trabajaron con éste, proveniente de un proceso integral de

biorrefinamiento (se extrajo el aceite para obtener biodiésel) pretratado con NaOH a distintos tiempos y temperaturas, así como un blanco sin tratar. Los resultados mostraron un mayor rendimiento para el bagazo sin tratar con un máximo de 250 mL·g<sup>-1</sup> TS, mientras en los pretratados, su mejor resultado fue 83 mL·g<sup>-1</sup> TS con NaOH a 0°C por 30 min. Mientras tanto, en 2016, Baladhiya y Joshi produjeron biogás a partir de bagazo de semilla de higuera y heces de burro en diferentes concentraciones en peso seco de los sustratos. El mejor resultado fue un rendimiento entre 13% y 18% agregando un 20% de heces en polvo. La relación C/N obtenida estuvo entre 22:1 y 27:1, mientras que la composición del biogás no fue reportada.

## 2.8 Compostaje.

El compostaje es la descomposición biológica de sustratos orgánicos, realizado por un consorcio microbiano diverso y predominantemente en condiciones aerobias, generando un material estable, libre de patógenos y que puede aplicarse en el suelo. Proporciona la posibilidad de transformar los residuos orgánicos para proveer de insumos a la producción agrícola, evitando con esto su desperdicio, generalmente por desconocimiento, en prácticas inadecuadas como la quema, el enterramiento y el abandono del material a la intemperie (Oviedo, 2017).

### 2.8.1 Condiciones a cuidar en el compostaje.

Durante el compostaje hay una serie de condiciones fundamentales que deben de cuidarse, las cuales son descritas a continuación que deben de cuidarse (Román et al., 2013):

- **Humedad:** La falta de agua en la composta, hace que el proceso de descomposición no sea total y la materia no se descomponga totalmente. Cuando está en exceso, los poros son ocupados por el agua, haciendo que no exista suficiente oxígeno en la mezcla y los microorganismos no puedan

desarrollarse. Se recomienda en un rango de entre 30 % y 65 % sin superar nunca el 80%.

- **Porosidad:** La porosidad, textura, estructura y tamaño de partícula del suelo utilizado tienen un papel importante en la descomposición de la materia orgánica, para favorecer la aireación, el desarrollo de los microorganismos y retención de humedad.
- **Relación C/N:** La relación carbono - nitrógeno se coloca inicialmente entre 25:1 y 35:1. La materia prima de origen animal (heces) suelen contener grandes cantidades de nitrógeno, por lo que su mezcla con la cantidad adecuada de suelo, así como de material vegetal (paja, corteza de árboles, restos agrícolas, bagazo, entre otros) es necesario para la adecuada integración del sustrato en el suelo.

#### 2.8.2 Etapas del compostaje.

Al ser un proceso la obtención de la composta puede dividirse en 4 etapas para su mejor estudio. A continuación, se detalla cada etapa, con un resumen visual en la figura 15:

- **Fase mesófila:**

Esta etapa va desde el inicio de la mezcla hasta los primeros días. Se caracteriza por un aumento desde temperatura ambiente hasta cerca de los 45°C, caracterizada por el aumento de temperatura, ya que los microorganismos utilizan los compuestos más sencillos que contienen C y N para descomponerlos en azúcares y ácidos, lo que puede bajar el pH hasta valores cercanos a 4 (Oviedo et al., 2017).

- **Fase termófila:**

En esta etapa es cuando actúan las bacterias termófilas, descomponiendo los compuestos más complejos de la composta, tales como celulosa y lignina. También se transforma el nitrógeno disponible en amoníaco, subiendo el pH. La temperatura sube hasta rangos entre 60 y 70 °C, pudiendo durar desde semanas hasta meses, dependiendo de las condiciones ambientales. También llamada etapa de higienización, ya que las altas temperaturas esterilizan a la composta de microorganismos dañinos para la salud (Román et al., 2013)

- **Fase de enfriamiento o mesófila II:**

En esta fase, al agotarse las fuentes complejas de carbono y de nitrógeno, la temperatura desciende hasta cerca de los 40°C, continuando la degradación de complejos como la celulosa. Pueden aparecer hongos visibles en la mezcla. Los organismos mesófilos reinician su actividad a esta temperatura y puede llegar a confundirse con la etapa de maduración al ser ya muy poco el material no integrado en la composta. Dura algunas semanas (Christensen, 2010).

- **Fase de maduración:**

Es un proceso que dura meses y se caracteriza por el olor a preticor (llamado popularmente “tierra mojada”), con procesos de formación de ácidos fúlvicos y húmicos. El sustrato está completamente integrado en la composta en esta etapa (Román et al., 2013).

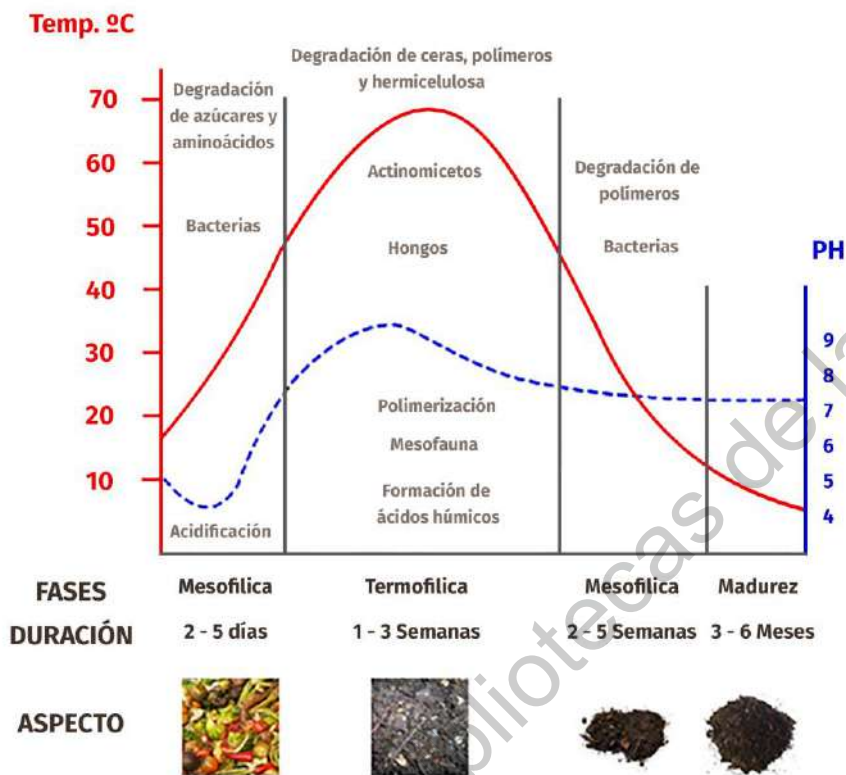


Figura 15. Etapas del compostaje (Villas e Ingouville, 2019).

### 2.9 Generalidades de la higuera (*Ricinus communis*).

Tiene diversos nombres comunes como higuera, higuera infernal, ricino, palma de Cristo o palma africana. Es una planta herbácea de color verde claro a azul-grisáceo y a veces rojizo que alcanza una altura de hasta 6 m. Originaria de África, se extendió a Medio Oriente hace alrededor de 4000 años. En India y China era conocida y utilizada desde hace 3000 años; posiblemente se introdujo en América después de su descubrimiento. Era altamente estimada desde la antigüedad debido a que su aceite, de fácil extracción, era utilizado en el alumbrado de casas. En el caso de México es una planta exótica invasora; en muchas regiones acompaña las carreteras y es dominante en terrenos abandonados, así como quebradas y cursos de ríos. A la vez es una planta cultivada en algunas regiones por el aceite de sus semillas (CONABIO, 2019; INIFAP, 2018). Se muestra un ejemplar en la figura 16.



Figura 16. *Ricinus communis* (Fuente propia).

Crece en altitudes desde el nivel del mar hasta 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Las mejores condiciones para su desarrollo se logran en climas cálidos y secos con precipitación de 600 a 1200 mm anuales, con establecimiento al inicio de la época de lluvias; a una baja humedad relativa (alta humedad provoca la pudrición del fruto), la temperatura promedio anual debe oscilar entre 20°C y 26°C, el pH del suelo debe oscilar entre los valores 5 y 6.5 en suelos bien drenados y ricos en materia orgánica, además requiere de por lo menos 10 horas-luz por día (SIAP, 2017). La taxonomía de *R. communis* se muestra en el cuadro 6.



Cuadro 6. Clasificación taxonómica de la higuera *Ricinus communis*.

<b>Dominio</b>	Eukarya
<b>Reino</b>	Plantae
<b>Subreino</b>	Tracheobionta
<b>Superdivisión</b>	Spermatophyta
<b>División</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Magnoliopsida
<b>Subclase</b>	Rosidae
<b>Orden</b>	Malpighiales
<b>Familia</b>	Euphorbiaceae
<b>Subfamilia</b>	Acalyphoideae
<b>Tribu</b>	Acalypheae
<b>Subtribu</b>	Ricininae
<b>Género</b>	<i>Ricinus</i>
<b>Especie</b>	<i>R. communis</i>

FUENTE: CONABIO, 2019.

En cuanto a su descripción botánica tiene una raíz pivotante y puede alcanzar hasta 3 m de profundidad, constituyendo su anclaje principal. La planta está dotada de un tallo principal recto y hueco en su interior que facilita la eliminación de la soca. Su color depende de la variedad y puede ser verde, rosado o caoba. Tiene hojas alternas, pecioladas, palmeadas de 7 a 11 lóbulos, dentadas, con nerviación palmatinervia de color verde a rojo. Las flores están agrupadas en una panícula terminal de 10 a 40 cm de largo (SIAP, 2017).

Su fruto son cápsulas globosas con pedicelo alargado con tres lóculos de 1.5 a 2.5 cm de diámetro, generalmente espinosos. Cuando están inmaduros tienen color verde a rojo, mientras que se vuelven cafés tras la maduración. Sus estigmas permanecen en el fruto en forma leñosa. La cápsula puede abrirse y soltar las semillas (Ponce, 1984).

## 2.10 Higuierilla en México.

Llegó a América durante la conquista de La Florida por parte de España. Sin embargo, tras ese evento inicial, no hubo más expansión durante al menos 100 años. Se estima que, con las actividades de misión de la Iglesia Católica, la planta se distribuyó rápidamente, iniciando por las costas del Golfo de México. Con base en observaciones hechas por el misionero jesuita Miguel de Barco, en 1780, se puede deducir que la higuierilla se encontraba ampliamente distribuida en la entonces Nueva España hasta lugares tan lejanos como Alta California. La frecuencia del pastoreo libre de la época y la expansión de las misiones jesuitas ayudó a la rápida expansión de la planta. Se encuentra distribuida desde los áridos desiertos del norte hasta los climas cálidos y húmedos del sur, descrito por la figura 17. Debido a esa amplia flexibilidad de ecosistemas que habita y su abundancia, se ha llegado a considerar como maleza (Garcillán y Rebman, 2016; SIAP, 2017).

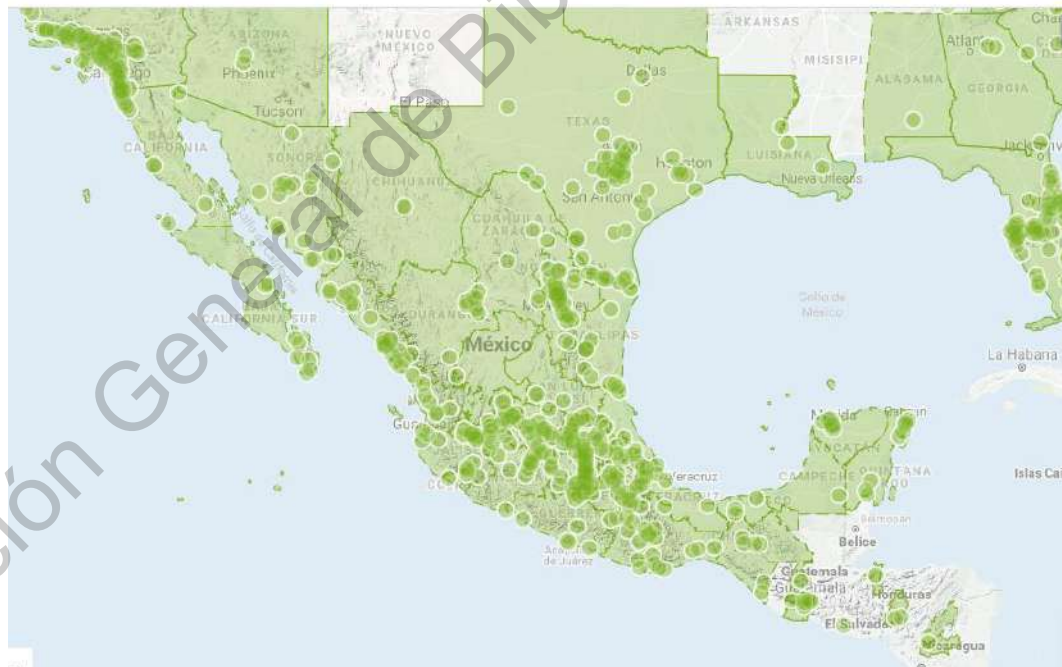


Figura 17. Distribución de *Ricinus communis* en México (Naturalista, 2019).

México tiene que ajustarse a los compromisos adquiridos mediante los Acuerdos de París mediante la producción de cultivos oleaginosos no comestibles (ONU, 2016).

Precisamente sobre este último, México produjo 3500 toneladas de higuera en 2017 según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Por otra parte, en 2016 importó 3.9 millones de litros de aceite de ricino principalmente proveniente de la India. Desde ese mismo año, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) ha impulsado un programa nivel nacional para el establecimiento de siembra de higuera en los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit, Hidalgo y Michoacán para aumentar de las 9520 hectáreas sembradas en 2016 a 70000 para el año 2024, con uso principal como bioenergético, específicamente la producción de biodiésel, en asociación con SENASICA, INIFAP y CONACyT. Se ha llegado a estimar incluso un potencial para la siembra de cerca de 4 millones de hectáreas de higuera (Díaz, 2009; SENER, 2016).

#### 2.11 Usos de la higuera

Es utilizada para darle sombra a las plantas de cacao y café por su rápido crecimiento y tamaño y forma de las hojas. Como protección de riberas de ríos por su adaptabilidad a suelos arenosos (SIAP, 2017).

El aceite refinado se usa en cosméticos y productos medicinales (como purgante en muchos casos). Cuando se sulfona, se usa en acabados de productos de algodón, lino o seda. Deshidratado sirve como líquido para frenos y en motores de altas revoluciones. Disuelto en etanol se utiliza en perfumes. La fusión a altas temperaturas con sosa se emplea para fabricar NYLON y plásticos. Además, se usa en la manufactura de caucho, de asfalto, de ceras, en el encurtido de pieles, como aislante, en insecticidas, crayones, espumas, velas, entre otros (Hernández y Zamarripa, 2013).

El bagazo es un excelente abono por sus nutrientes, con porcentajes en masa de 2% de nitrógeno, 0.28% de fósforo, 3% de potasio y 34% de proteína cruda. Se usa sobre todo en cultivos de período corto. Pierde su toxicidad a las dos semanas. También tiene propiedades insecticidas en los cultivos aplicados. Por último, se han

realizado estudios al bagazo con tratamientos térmicos para utilizarla como alimento para ganado, pero aún no está extendido ni estandarizado (Jiménez y col., 2013).

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

### **3 OBJETIVOS**

#### 3.1 General

Producir biogás a partir de mezclas de bagazo de semilla de higuera (*Ricinus communis*) en condiciones mesofílicas anaerobias.

#### 3.2 Específicos

1. Evaluar relación en masa de bagazo de semilla de *Ricinus communis* y heces de cerdo para la producción de metano.
2. Analizar la composición química del biogás obtenido.
3. Obtener composta a partir del material restante de la obtención de biogás.

#### **4 HIPÓTESIS**

El rendimiento en la obtención de biogás a partir de bagazo de semilla de *Ricinus communis* será mayor cuando se mezcle con estiércol de cerdo que cuando se use solo, debido a la introducción en el proceso de organismos metanogénicos, inherentes a las heces animales, y el aumento de la relación carbono – nitrógeno.

## 5 METODOLOGÍA

5.1 Adquisición de sustratos: Bagazo de semilla de higuera (*Ricinus communis*) y heces de cerdo.

El bagazo de higuera fue adquirido de la Fábrica de Aceites “Torres Barriga” ubicada en la ciudad de Oaxaca en el estado de Oaxaca; donde el aceite de las semillas de higuera es extraído a través de un proceso que usa prensas hidráulicas. El empaquetado se hizo en costales y se dejó en un lugar fresco y seco para su conservación.

Las heces de cerdo se obtuvieron de un criadero ubicado en la comunidad de Quiotillos, municipio de Amealco en el estado de Querétaro. Se colocaron en cubetas plásticas de HDPE, previamente lavadas y desinfectadas. Finalmente se refrigeraron a 4°C para evitar su descomposición por hasta 2 meses.

5.2 Análisis químicos del bagazo y de las mezclas de bagazo con heces de cerdo.

La metodología seguida, en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, se detalla a continuación:

5.2.1 Análisis de carbono mediante el método de Walkey y Black.

Se colocaron 0.5 g de heces de porcino secas, 0.5 g de bagazo de higuera seco y un blanco de reactivos, en un matraz Erlenmeyer de 500 mL por triplicado. Se añadieron exactamente 10 mL de dicromato de potasio 1 N girando el matraz para que entrara en contacto con toda la muestra. Después se agregaron 20 mL de ácido sulfúrico concentrado a la suspensión y se agitó por un minuto. Se dejó reposando por 30 minutos sobre una mesa de madera (evitando superficies de metal o cemento). Pasado el tiempo, se añadieron 200 mL de agua destilada grado reactivo, 5 mL de ácido fosfórico concentrado y 10 gotas de indicador de difenilamina, en ese orden. Se titularon con disolución de sulfato ferroso 1 N, gota a gota hasta el punto

final que es de color verde claro. El valor de carbono se obtuvo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\%C = \left( \frac{B - T}{g} \right) (N)(mcf)(0.6724)$$

Donde:

B= Volumen de sulfato ferroso para valorar el blanco de reactivo (mL).

T= Volumen de sulfato ferroso para valorar la muestra (mL).

N= Normalidad del sulfato ferroso.

g= Peso de la muestra (g).

mcf= Factor de corrección de la humedad.

#### 5.2.2 Análisis de nitrógeno total mediante el método de Kjeldahl:

Se colocaron 0.5 g de muestra (bagazo y heces de cerdo) en un matraz de fondo plano de 500 mL. También se preparó un blanco de reactivos siguiendo los mismos pasos de la preparación de muestra realizando cada uno por triplicado. Se añadieron 1.1 g de catalizador de sulfato de potasio y 3 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se taparon con tubo de seguridad y calentó a 150°C por una hora en la campana de seguridad a partir de que se tornó de color verde claro la muestra. Una vez pasado el tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente y pusieron 20 mL de agua destilada grado reactivo. Se transfirió el contenido a la cámara de calentamiento de un aparato de destilación y se agregó 10 mL de solución de hidróxido de sodio 10 N. En el tubo de salida, se colocó un matraz Erlenmeyer de 250 mL que contenía 10 mL de solución de ácido bórico 1% e indicador. Se destiló hasta que el volumen alcanzó la marca de 75 mL en el matraz Erlenmeyer que contenía la solución de ácido bórico 1%. Finalmente se procedió a la titulación con ácido sulfúrico 0.01 N y una microbureta de 10 mL con graduaciones de 0.01 mL. El cambio de color de verde a rosa fuerte indicó el punto final de la titulación. El porcentaje de nitrógeno total se realizó mediante la siguiente fórmula:



$$\%N_{total} = \frac{14(V_m - V_b)(N)}{10w}$$

Donde:

$V_m$ = Volumen de ácido sulfúrico empleado para titular la muestra en mL.

$V_b$ = Volumen de ácido sulfúrico utilizado para titular el blanco en mL.

$N$ = Normalidad del ácido sulfúrico.

$w$ = Peso de muestra en gramos.

### 5.2.3 Cálculo de la relación carbono – nitrógeno.

Los datos obtenidos de los análisis de carbono y nitrógeno fueron ponderados con la siguiente fórmula para cada uno de los tratamientos utilizados para la producción de biogás y de esta manera calcular su relación C/N, de acuerdo al Manual de Biogás de la FAO (2011):

$$K = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots + C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots + N_nQ_n}$$

$K$ = C/N de la mezcla de los sustratos.

$C$ : Porcentaje de carbono orgánico contenido en cada sustrato.

$N$ : Porcentaje de nitrógeno total en cada sustrato.

$Q$ : Peso fresco de cada sustrato, expresado en kg o ton.

### 5.3 Elección y construcción del biorreactor.

Se utilizaron recipientes plásticos de PET con tapa de HDPE de 500 mL de capacidad. En la tapa se acoplaron llaves de paso de gas de 3/8" con la ayuda de machuelos y se sellaron con la ayuda de sellador de silicón transparente marca TRUPER y se dejaron secando durante 48 h. Una vez pasado el tiempo, se aseguraron las posibles grietas y el ajuste de la tapa con cinta teflón. El resultado se muestra en la figura 18.



Figura 18. Sistema de biorreactores para la producción de biogás (Fuente propia).

#### 5.4 Obtención de biogás mediante bagazo de semilla de higuera.

Para esta parte se utilizó solamente bagazo para producir biogás. Para esto se siguió el procedimiento modificado, propuesto por Raheman y Mondal (2010):

Primero se determinó, tanto para el sustrato (bagazo) y cosustrato (heces) el porcentaje de humedad y sólidos totales con base en las normas NMX-AA-16-1984 y NMX-AA-034-SCFI-2001, respectivamente. Los sólidos totales se calcularon por la diferencia de 100% menos el porcentaje de humedad. Durante 30 d se pusieron los reactores con la cantidad de sustrato y agua indicada en el cuadro xx, midiendo la cantidad de biogás producido (en los días 5, 10, 15, 20 y 30) con un sistema como el mostrado en la figura xx, esto con el fin de evaluar la cantidad producida y cinética de producción en cada uno de los tratamientos. Las heces de cerdo al 10% se utilizaron como control positivo. Se utilizaron 350 g de mezcla total en cada uno de los recipientes y se colocaron en una cámara a temperatura ambiente para dejarlas realizar el proceso de fermentación anaerobia.

Cuadro 7. Composición de bagazo de higuera (BH) y heces de cerdo (HC) para estudiar su producción potencial de biogás.

Trat.	%ST de BH	%ST de HC	% Agua	Peso total mezcla (g)
1	0.0	10.0	90.0	800
2	10.0	0.0	90.0	800
3	15.0	0.0	85.0	800
4	20.0	0.0	80.0	800
5	25.0	0.0	75.0	800

\* Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado de un factor (el factor son los diferentes tratamientos) en condiciones de laboratorio. Cada unidad experimental consistió en un biorreactor con capacidad de 500 mL. El sistema de medición utilizado se muestra a continuación la figura 19.



Figura 19. Sistema de probetas utilizado para la medición de biogás.

### 5.5 Obtención de biogás mediante mezcla de bagazo – heces de cerdo.

Se siguió un procedimiento modificado con base al trabajo realizado por Sarabia y col. en 2016, para lo que primero, se determinó, tanto para el sustrato (bagazo) y cosustrato (heces) el porcentaje de humedad, sólidos volátiles totales NMX-AA-16-1984 y NMX-AA-034-SCFI-200, respectivamente. Los sólidos totales se calcularon por la diferencia de 100% menos el porcentaje de humedad.

Se montaron 5 tratamientos con 350 g de peso total de mezcla en los biorreactores, que contuvieron 10% en peso total de los sustratos y un 90% de agua. En el cuadro 8 se muestra la relación utilizada en cada uno de los tratamientos realizados.

Cuadro 8. Composición de bagazo de higuera (BH) y heces de cerdo (HC) para estudiar su producción potencial de biogás.

<b>Trat.</b>	<b>%SV de BH</b>	<b>%SV de HC</b>	<b>% Agua</b>	<b>Peso total mezcla (g)</b>
1	0.0	10.0	90.0	800
2	2.5	7.5	90.0	800
3	5.0	5.0	90.0	800
4	7.5	2.5	90.0	800
5	10.0	0.0	90.0	800

\* Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Se dejaron en biodigestión anaerobia por 30 d, midiendo la cantidad de biogás producido en los días 5, 10, 15, 20 y 30; mediante un sistema de probetas (mostrado en la figura xx) a fin de evaluar la cantidad total y la rapidez de producción de biogás.

Para poder hacer un análisis más sencillo de los resultados se realizó el cuadro 9, mostrado a continuación, donde las distintas mezclas de bagazo con heces de cerdo fueron abreviadas:

Cuadro 9. Abreviaturas utilizadas en el experimento producción de biogás con mezclas de bagazo semilla de higuera y heces de cerdo.

Tratamiento	Equivalencia
10% HC	T1
7.5% HC – 2.5% BH	T2
5% HC – 5% BH	T3
2.5% HC – 7.5% BH	T4
10% BH	T5

HC = Heces de cerdo; BH = Bagazo de semilla de higuera.

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado de un factor en condiciones de laboratorio. Cada unidad experimental consistió en un biorreactor con capacidad de 500 mL.

#### 5.6 Realización de composta.

Tras pasar por el proceso de obtención de biogás, las distintas mezclas de heces de cerdo y bagazo, así como el bagazo solo, se colocaron en un compostero, realizado con cubetas de HDPE agujereadas en la parte inferior (para que tuviera aireación y salida de líquidos), como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Composteros utilizados para la producción de composta.

### 5.7 Análisis estadístico.

Todos los datos obtenidos de los tratamientos evaluados se realizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor. Asimismo, se corrió la prueba múltiple de Tukey ( $p=0.95$ ) para determinar las diferencias entre tratamientos. Ambas se corrieron en el programa MINITAB versión 2018.

Dirección General de Bibliotecas de la UPAO

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Resultados de la relación Carbono – Nitrógeno

En el siguiente cuadro se muestran las relaciones C/N obtenidas para cada uno de los sustratos de acuerdo con los análisis realizados:

Cuadro 10. Relaciones carbono – nitrógeno del bagazo de higuera y las heces de cerdo.

Sustrato	Relación C/N
Bagazo de semilla de higuera	11.6:1
Heces de cerdo	47.7:1

La relación ideal de carbono - nitrógeno, para la obtención de biogás de acuerdo con Banks y Heaven (2013), debe estar entre 20:1 a 30:1. En este trabajo la relación C/N del bagazo de semilla de higuera resultó ser 42% inferior al mínimo sugerido para la elaboración del biogás, mientras que la relación C/N en las heces de cerdo fueron 59% superior al límite máximo.

Una vez realizado obtenidas las relaciones carbono – nitrógeno de ambos sustratos, se procedió a calcular las proporciones de los tratamientos de acuerdo con las fórmula propuesta por la FAO en 2011:

Cuadro 11. Relaciones carbono – nitrógeno calculadas para cada tratamiento.

Tratamiento	Relación C/N
10% BH	11.62:1
15% BH	11.62:1
20% BH	11.62:1
25% BH	11.62:1
10% HC	47.70:1
7.5% HC – 2.5% BH	26.58:1
5% HC – 5% BH	18.51:1
2.5% HC – 7.5% BH	14.25:1
BH= Bagazo de higuierilla, HC= Heces de cerdo	

Se observó que, en los tratamientos donde sólo se utilizó bagazo de semilla de higuierilla como sustrato, se mantuvo intacta su relación C/N al igual que en el tratamiento que sólo utiliza heces de cerdo, debido a que no se agrega ningún otro sustrato, y el agua no aporta carbono o nitrógeno al tratamiento en cantidades significativas, por lo que no se tomó en cuenta.

Cabra et al. (2015) hablan de una composición de 33.9% de carbono orgánico y 1.9% de nitrógeno para el bagazo de semilla de higuierilla, lo que da una relación C/N de 17.7:1. Comparado con el bagazo de semilla de higuierilla utilizado en este experimento, que fue de 11.62:1, se está por debajo de lo reportado por Cabra et al. Las diferencias con el bagazo utilizado pueden deberse al tratamiento térmico para la obtención de su aceite entre ambos trabajos, hasta los nutrientes presentes en el suelo de cultivo y condiciones de almacenamiento.

Por otro lado, Morales et al., en el 2011, encontraron relaciones C/N de entre 8.8:1 y 10.6:1 para las heces de cerdo maduras. Sin embargo, en el mismo estudio, se habla de una pérdida de la cantidad de carbono debido a la pérdida como dióxido de carbono. También se ha notado un aumento en la cantidad de nitrógeno en las heces de cerdo a nivel industrial debido a los cambios de alimentación de estos animales, resultando en una relación C/N menor (Hernández, 2020). Por tanto, la



alimentación de los cerdos en el lugar de recolección, que fue completamente natural y a pequeña escala, probablemente hizo que la relación carbono - nitrógeno fuera mayor, comparándose de hecho el valor de nitrógeno obtenido, pero con mayor cantidad de carbono que el teórico.

## 6.2 Obtención de biogás mediante distintas cantidades de bagazo de semilla de higuera.

Los resultados obtenidos se muestran en los apartados 6.2.1, 6.2.2 y 6.2.3:

### 6.2.1 Evolución en la obtención de biogás con bagazos de semilla de higuera en distintas cantidades.

En la figura 21 se muestra la producción de cada uno de los días indicados en la medición en mililitros por gramos de sólidos totales, juntos con las barras de error correspondientes a cada uno.



Figura 21. Evolución de la obtención de biogás con distintas cantidades de bagazo de semilla de higuera (C+= Control positivo; 10%, 15%, 20%, 25% = porcentajes de bagazo de higuera utilizados).

El tratamiento de control positivo, que fueron heces de cerdo al 10%, obtuvo una mayor cantidad de gas en cada una de las mediciones realizadas, a excepción del día 5, donde el bagazo al 10% fue el que obtuvo el mayor rendimiento, alcanzando un máximo de producción en el día 10, donde se llegó a  $2.4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ . Para la concentración de bagazo al 10%, con excepción de la medición en el día 5, siguió un comportamiento muy parecido al de las heces de cerdo, aunque con rendimientos ligeramente inferiores alcanzando su pico de rendimiento en el día 10 con  $1.7 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ . La concentración de 15% de bagazo presentó su pico en la medición del día 10, con  $0.66 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales, siguiendo un comportamiento similar al de los tratamientos de C+ y bagazo al 10%, aunque estadísticamente distintos al tratamiento de 15% a excepción del día 15.

Finalmente, los tratamientos de 20% y 25%, siguieron una tendencia similar a lo largo de los días, siguiendo una línea creciente hasta alcanzar su pico en el día 30, lo que significa que el tiempo de retención fue mayor para el caso de estas concentraciones con más sólidos totales, debido a la dificultad que acarrea a los microorganismos el procesar una mayor cantidad de materia orgánica. Se puede observar que, en algunos puntos, las diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos son claras debido a que las barras de error no llegan a traslaparse. Se realizó prueba de Tukey al experimento para descartar o no, las diferencias significativas entre tratamientos en cada uno de los días, obteniendo con ello el siguiente cuadro.

Cuadro 12. Evolución de la producción de gas con bagazo de semilla de higuierilla en mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales.

Trat.	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20	Día 30
C+	0.40±0.07a	2.24±0.32a	1.76±0.12a	0.93±0.11a	1.41±0.33a
10% BH	1.32±0.65a	1.64±0.21ab	0.83±0.19b	0.77±0.33a	0.99±0.35a
15% BH	0.41±0.14a	0.66±0.25b	0.51±0.15b	0.40±0.14a	0.64±0.26a
20% BH	0.44±0.12a	0.42±0.01b	0.43±0.17b	0.44±0.06a	0.61±0.28a
25% BH	0.60±0.14a	0.58±0.15b	0.64±0.21b	0.83±0.20a	1.10±0.01a

Trat. = tratamiento, C+ = heces de cerdo al 10% en sólidos totales, BH = Bagazo de higuierilla. Resultados promedio de tres repeticiones ± error estándar de la media. ND = No se determinó el error estándar al ser resultado de un solo dato. Letras diferentes indican diferencia significativa (Prueba de Tukey, P<0.05).

En el total de mediciones, los promedios de gas obtenidos para los tratamientos de control positivo y bagazo al 10% tuvieron mayores valores, el error estándar fue alto en muchos de los casos, por lo que las diferencias no fueron estadísticamente significativas en la comparación con los otros tratamientos (15%, 20% y 25% de bagazo de semilla de higuierilla). En el tratamiento de control positivo contra la comparación de los tratamientos de bagazo, fue estadísticamente distinta en los días 10 y 15, pero no en el resto a pesar de su producción en algunos casos hasta con el triple de cantidad contra algún tratamiento, que puede atribuirse a diversas causas, como la estabilización del tratamiento, diseño de reactores entre otros.

Respecto a la evolución en la obtención de biogás, hay algunos trabajos acerca de ello. Barik y Murugan en el 2015, en su trabajo con *Pongamia pinnata* y heces de vaca, observaron que los tratamientos evaluados mostraron un comportamiento siempre ascendente durante los 30 días de duración del experimento, no hubo fluctuaciones como en el presente trabajo. Alcanzaron su máximo rendimiento con el tratamiento correspondiente a 25% de *P. pinnata* y 75% de heces de vaca (correspondientes a 5.26 mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales) a los 30 días, mientras que el tratamiento con 100% de heces de vaca, tuvo un rendimiento de 800 mL acumulados también a los 30 días. Por otro lado, Gavilanes et al., en el 2017 realizaron un ensayo con bagazo de semilla de *Jatropha curcas* al 20%, donde sólo

se utilizó bagazo de semilla de esta especie para obtener biogás, alcanzando un máximo rendimiento acumulado de 60 mL en el día 21, correspondientes a 9.66 mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales, teniendo un comportamiento siempre ascendente durante las 3 semanas de duración de la corrida. En este trabajo, se alcanzó un rendimiento inferior que, en el estudio de Gavilanes et al., siendo 45% menor, mientras que sí se obtuvo mayor rendimiento acumulado con el tratamiento de 10% de bagazo de higuera en el presente trabajo que lo ocurrido con el experimento de Barik y Murugan, quienes también evaluaron bagazo de una especie de la familia Euphorbiaceae. Sin embargo, el comportamiento mostrado en ambos experimentos de bibliografía la recta fue ascendente, comparado con el fluctuante en este trabajo. Por tanto, el comportamiento en la evolución mostrado por los tratamientos utilizados de *Ricinus communis* son distintos a los obtenidos en bibliografía, y fueron causados probablemente por la diferencia de condiciones ambientales, posibles fugas en los biorreactores y obtención de los sustratos entre experimentos (en ambos el aceite fue obtenido por arrastre con solventes mientras que en este trabajo fue mediante prensa hidráulica).

#### 6.2.2 Evolución del pH.

Los promedios de las mediciones de pH en los distintos días durante el proceso de obtención de biogás se muestran en la figura 22:

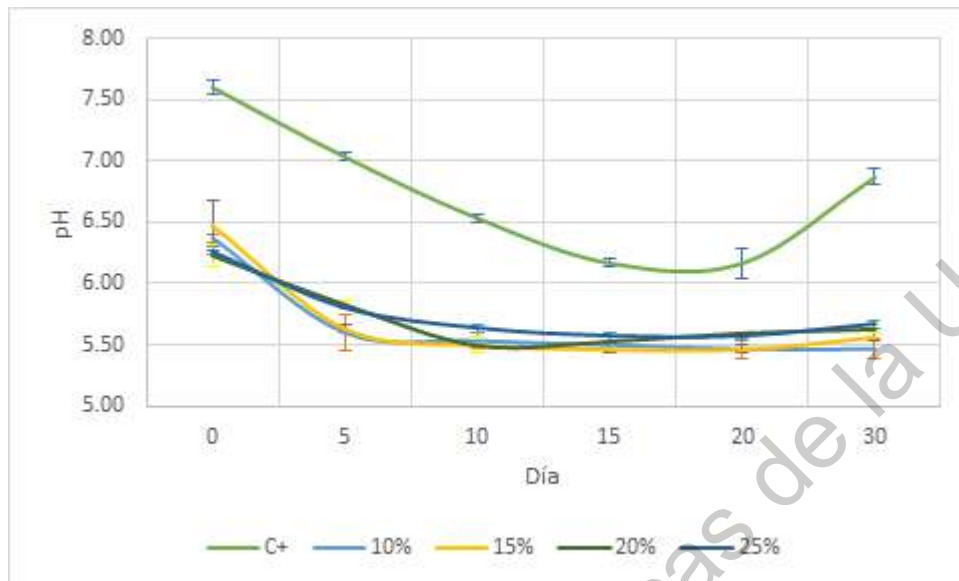


Figura 22. Evolución del pH en los reactores de los distintos tratamientos para la obtención de biogás con semilla de bagazo de higuera. Se incluyen las barras de error estándar.

Se observó que el pH se mantuvo en un rango de 6.5 a 8 en el caso del tratamiento de heces de cerdo. Primero comenzó con un pH de 7.6, debido a la alcalinidad intrínseca de las heces de cerdo. Fue disminuyendo con el paso de los días debido a las etapas acidificantes de la metanogénesis para finalmente ascender hasta alcanzar un valor cercano a 7 durante la fase de producción más estable del biogás. Los valores siempre estuvieron dentro del rango de idealidad de producción. Para los tratamientos con bagazo de semilla de higuera no hubo diferencias significativas entre ellos pero sí fueron significativamente distintos al control positivo. Los valores promedio fueron muy parecidos en cada medición a lo largo de los días, empezando en pH cercano a 6.5, disminuyendo gradualmente durante las etapas acidificantes del medio, alcanzando rangos cercanos a 5.5, donde la producción de biogás no es ideal y se inhibe en algunos casos. Finalmente se alcanzó la estabilidad y llegó a valores cercanos a 6.0, pero fuera del rango de estabilización de la producción de biogás (el mínimo es 6.5) por lo que es necesario, en

tratamientos futuros, la adición de compuestos alcalinos para alcanzar el mínimo de pH necesario para la producción ideal de biogás.

Un seguimiento puntual del pH se realizó en el trabajo de Raheman y Mondal, del 2011, donde utilizaron distintas concentraciones de bagazo de *J. curcas* para la obtención de biogás. A lo largo de 6 semanas siguieron el comportamiento del pH, tanto al tratamiento donde sólo utilizaron heces de cerdo, como a los de *J. curcas*. En cada uno de los ensayos se pudo ver una tendencia a mantenerse en un pH cercano al valor de 6, excepto para aquel donde usaron bagazo en concentración de 20%, donde estuvo cercano a 7 y fue significativamente distinto. En el caso del presente experimento realizado, se observó una disminución, para todos los tratamientos donde se usó bagazo de higuera, desde 6.5 hasta 5.5, aproximadamente, promediando cerca del valor de 6, por lo que los valores son comparables a la obtención de biogás realizada con *J. curcas*.

6.2.3 Biogás acumulado proveniente del bagazo de semilla de higuera en distintas cantidades.

En la figura 23 se muestra la sumatoria acumulada en la cantidad de biogás para todos los tratamientos, incluyendo el control positivo, junto con sus barras de error de 5%:

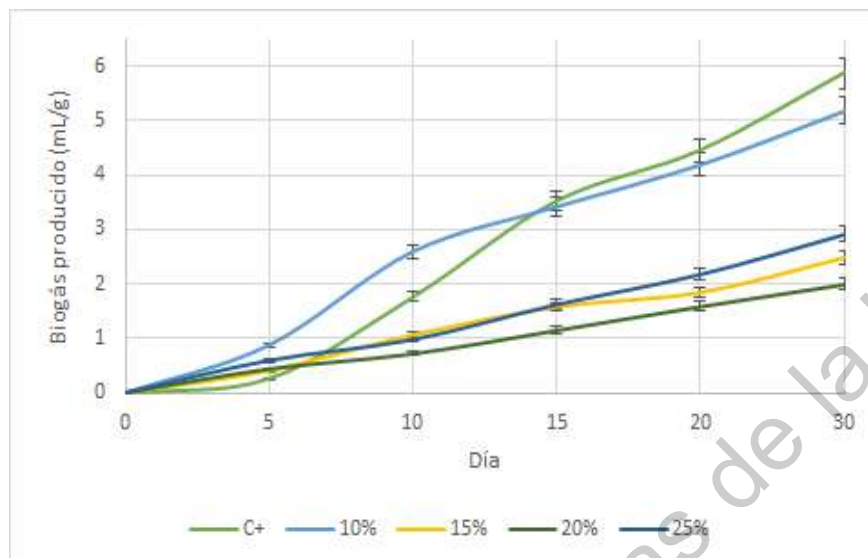


Figura 23. Acumulación de biogás en la producción con semilla de bagazo de higuera (C+= Control positivo; 10%, 15%, 20%, 25% = porcentajes de bagazo de higuera utilizados).

El tratamiento con una mayor cantidad promedio de biogás acumulado fue el control positivo, donde se llegó a una cantidad final de  $5.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  de sólidos totales tras 30 días. Es de notar que, a pesar de ser el tratamiento con un menor volumen de biogás en la primera medición, después el comportamiento fue ascendente durante los siguientes 10 días hasta tener un promedio de rendimiento acumulado mayor durante el día 15 y estadísticamente diferente y mayor a los demás tratamientos en el día 30. El tratamiento de bagazo al 10%, siguió un comportamiento parecido al del control positivo, colocándose con un rendimiento ligeramente menor de  $5.2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  de sólidos totales, siendo estadísticamente igual que el control hasta el día 20 de medición. Para los tratamientos al 15%, 20% y 25%, siguieron una tendencia similar, pero con un rendimiento menor, de entre 2 a  $3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  de sólidos totales en comparación con los dos primeros tratamientos. Entre ellos fueron significativamente similares durante todas las mediciones excepto en la del día 30, donde el tratamiento de bagazo al 25% tuvo un rendimiento de  $2.9 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  de sólidos

totales, seguido de  $2.5 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales del tratamiento con bagazo al 15% y  $2.1 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales de bagazo al 20%.

Bateni et al., en el 2014 utilizaron bagazo de semilla de *R. communis* para la obtención de biogás, obteniendo  $40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales en el día 9,  $220 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  en el día 30 y  $240 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  en el día 40 de su experimento, mientras que en este trabajo, se observaron rendimientos de entre 6.69 y 45.15 veces inferiores. Esto pudo deberse a diferencias metodológicas, tanto de los biorreactores utilizados como cantidad total de sustrato (los reactores fueron mucho más pequeños que los de este trabajo) así como las condiciones de los reactores, posibles fugas y a la temperatura, que fue controlada (y en la idealidad de los microorganismos metanogénicos, que es  $35^{\circ}\text{C}$ ) en el caso de Bateni contra la temperatura ambiente de este experimento.

6.3 Obtención de biogás mediante distintas mezclas de bagazo de semilla de higuera con heces de cerdo.

6.3.1 Evolución en la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.

El promedio de las mediciones en los días 5, 10, 15, 20 y 30, junto con las respectivas barras de error de cada uno se presentan en la figura 24:



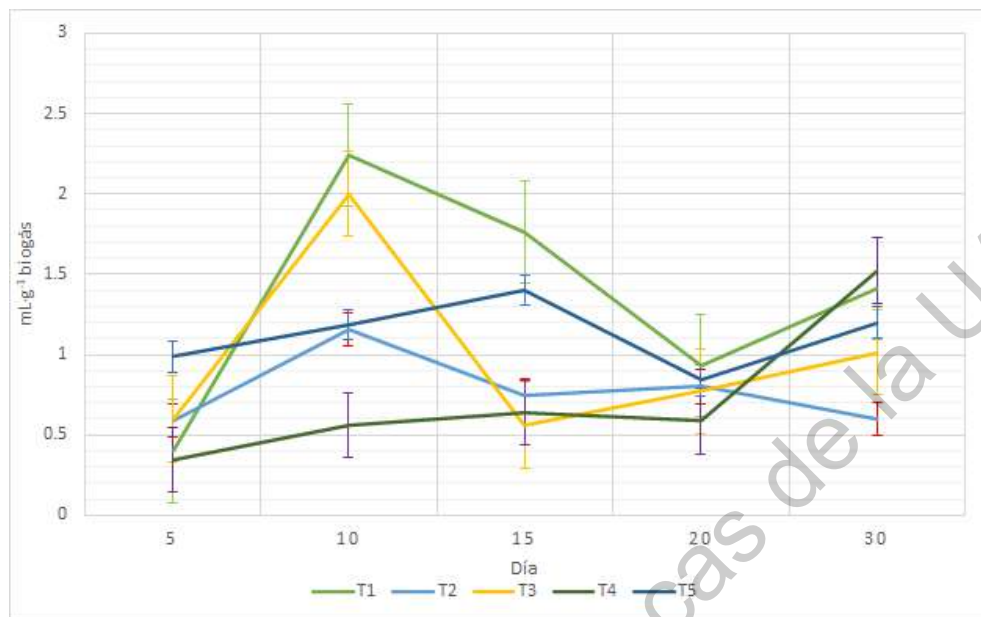


Figura 24. Evolución de la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.

Para el caso de T1 que se tiene como el control positivo del experimento, inició con un rendimiento muy bajo en el día 5, que es la etapa donde los microorganismos están en las primeras etapas de la descomposición del sustrato para hacer biogás; en el día 10 mostró el mayor cantidad de biogás con 2.24 mL·g<sup>-1</sup> para después descender en los días 15 y 20 y estabilizarse en la última medición en el día 30 con un promedio de 1.41 mL·g<sup>-1</sup>. El tratamiento T2 tuvo su máximo rendimiento en el día 10 con 1.16 mL·g<sup>-1</sup>, sin embargo, su tendencia fue la baja durante el resto de las mediciones, donde su tendencia fue inferior alcanzando su pico más bajo en el día 30 con 0.60 mL·g<sup>-1</sup>, prácticamente la mitad. El tratamiento T3, siguió una tendencia similar al tratamiento T1, alcanzó su punto más alto en el día 10, con un promedio de 2.00 mL·g<sup>-1</sup>, para después caer a su punto más bajo en el día 15 y subir su rendimiento de manera menos pronunciada pero constante en los días 20 y 30. Los tratamientos 4 y 5 tuvieron comportamientos muy distintos al de los tres primeros, pero similares entre sí. Desde el día 5, donde fue su primera medición, fue aumentando paulatinamente la cantidad de gas hasta el día 15 con 0.64 y 1.40

mL·g<sup>-1</sup>, respectivamente, siendo este el punto más alto. Decayeron a valores de 0.59 mL·g<sup>-1</sup> para el T4 y 0.85 mL·g<sup>-1</sup> para el T5, esto en el día 20, alcanzando el punto más bajo para volver a alcanzar valores de 1.52 mL·g<sup>-1</sup> (mayor cantidad del tratamiento T4) y 1.20 mL·g<sup>-1</sup> para el T5.

Cuadro 13. Evolución de la producción de gas con mezclas bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.

Trat.	Día 5	Día 10	Día 15	Día 20	Día 30
T1	0.40±0.07a	2.24±0.32a	1.76±0.12a	0.93±0.11a	1.41±0.33a
T2	0.59±0.22a	1.16±0.07a	0.75±0.16a	0.80±0.12a	0.60±0.02a
T3	0.60±0.12a	2.00±0.70a	0.56±0.04a	0.77±0.24a	1.01±0.37a
T4	0.35±0.05a	0.56±0.14a	0.64±0.14a	0.59±0.04a	1.52±0.46a
T5	0.99±0.36a	1.19±0.43a	1.40±0.62a	0.85±0.30a	1.20±0.44a

Trat. = tratamiento, T1 = heces de cerdo al 10%; T2 = 7.5 % heces de cerdo y 2.5 % de bagazo, T3 = 5 % heces de cerdo y 5% de bagazo, T4 = 2.5 % heces de cerdo y 7.5 % de bagazo, T5 = 10% de bagazo. Resultados promedio de tres repeticiones ± error estándar de la media. ND = No se determinó el error estándar al ser resultado de un solo dato. Las letras diferentes indican una diferencia significativa (Prueba de Tukey, P<0.05).

En el cuadro 13 se observa que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguna de las mediciones realizadas, por lo que la cantidad de biogás se considera igual para cada uno de los tratamientos.

Comparaciones con otros trabajos donde utilizaron bagazo de cultivos energéticos mezclado con heces animales.

Gupta et al., en el 2013, utilizaron mezclas de heces de vaca y bagazo de semilla de *Madhuca indica*, con mezclas que totalizaron un 10% de sólidos totales, tal y como en el presente trabajo. Se observó, un comportamiento parecido para todos los tratamientos evaluados por ellos, subiendo rápidamente desde los primeros días hasta alcanzar su pico entre los días 25 y 30, para luego decaer lentamente hasta cesar por completo la producción de biogás pasado el día 70. También cabe destacar que el menor rendimiento en el experimento fue a menor cantidad de heces de vaca, teniendo el menor rendimiento cuando se mezcló 75% de *M. indica* y 25%

de heces de vaca ( $10 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales). Mientras que el mayor rendimiento fue cuando se mezclaron iguales cantidades del bagazo y las heces ( $41 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales). Otra evaluación fue el trabajo de Della Vecchia en el 2010 cuando realizó mezclas de heces de vaca con paja de maíz, durante 30 días, para obtener biogás. La tendencia fue primero un proceso de arranque lento, debido al tiempo de establecimiento que requieren los microorganismos en el reactor (fase de *lag*); después sufrió un rápido aumento en la producción hasta alcanzar su máximo, cerca del día 15 con el tratamiento donde se mezcló a partes iguales paja de maíz con heces de cerdo, 40% de bagazo de maíz y 40% de heces de cerdo, obteniendo  $1.45 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales. Por otro lado, el menor rendimiento se obtuvo, por contra, con la mezcla de 30% de bagazo de maíz y 30% de heces de cerdo, alcanzando un máximo de  $0.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales. Este comportamiento fue muy parecido al mostrado en el presente trabajo, donde el mayor rendimiento se vio en las heces de cerdo y bagazo de higuera mezclados a partes iguales, siendo comparable la producción de biogás al tratamiento donde sólo se usaron heces de cerdo. Mientras que el menor rendimiento fue el que tuvo 25% de heces de cerdo.

Por tanto, se puede concluir, basado en este experimento y los trabajos mostrados de otros investigadores, que mezclar bagazo y heces a partes iguales y en mayor cantidad posible, se produce más cantidad de biogás. Y a menor cantidad de inóculo en forma de heces, es menor la producción. También la variación dentro de cada tratamiento puede ser grande, teniendo como posibles causas las fugas y distintas condiciones ambientales.

6.3.2 Evolución del pH en los reactores de la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.

Las mediciones para cada tratamiento se muestran en la figura 25:

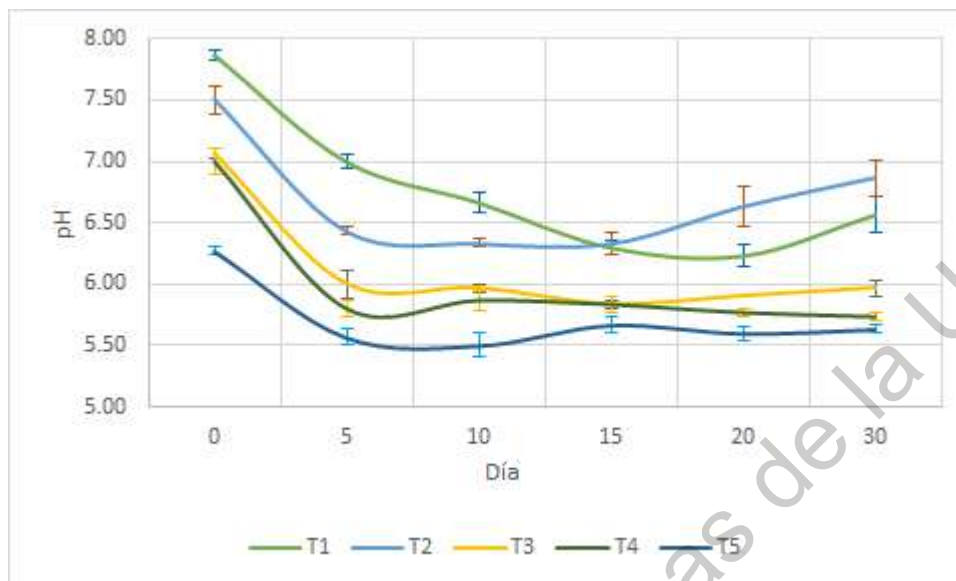


Figura 25. Evolución del pH en los reactores de los distintos tratamientos para la obtención de biogás con mezclas de bagazo de semilla de higuierilla y heces de cerdo.

Puede observarse en el tratamiento de 10% de heces de cerdo (T1) el pH se mantuvo en el rango de idealidad (pH entre 6.5 y 8). Un tratamiento con un comportamiento muy parecido en el pH fue el T2 que mantuvo más o menos el mismo rango a lo largo de la corrida. Los tratamientos del T3 a T5, estuvieron en pH más bien ácidos a partir de la medición en el día 5, llegando por debajo de 5.5. Sin embargo, las diferencias entre éstos no fueron estadísticamente distintas.

En un trabajo donde se realizó el seguimiento del pH fue el de Barik y Murugan en 2015, donde utilizaron heces de vaca y bagazo de *P. pinnata* para la obtención de biogás, haciendo un seguimiento puntual del pH durante 30 días. El menor pH inicial fue cuando se tuvo una mayor cantidad de bagazo (75%), estando en un valor de 5.5, aumentando paulatinamente con los días hasta estabilizarse cerca del día 20 y quedando en rangos de entre 6.5 y 7, que están dentro de la idealidad de acuerdo con la bibliografía. Mientras que el tratamiento donde utilizaron sólo heces de vaca, el pH se mantuvo estable en un valor de 7.2.

Comparado el experimento realizado por Barik y Murugan con el presente trabajo, el valor de pH fue más alto cuando mayor fue la cantidad de heces en la mezcla utilizada. Sin embargo, se estabilizó el pH dentro de valores entre 5.5 y 7, que es un mayor rango, y sale de la idealidad en este parámetro a los tratamientos que tuvieron bagazo de *R. communis* en porcentaje mayor a 5%, debido probablemente a las características del sustrato, donde el bagazo al tener mayor cantidad de carbono produce más ácidos orgánicos que las heces, donde el nitrógeno convertido a amoníaco provoca un efecto buffer que estabiliza el pH en valores dentro de 6.5 y 7. Por eso quizá sea necesario un tratamiento secundario o pretratamiento en los reactores con mayor cantidad de bagazo de higuera, para estabilizar el pH y mejorar la producción de biogás.

### 6.3.3 Biogás acumulado proveniente de las mezclas de bagazo de semilla de higuera con heces de cerdo.

Las mediciones acumuladas realizadas, se muestran en la figura 26:

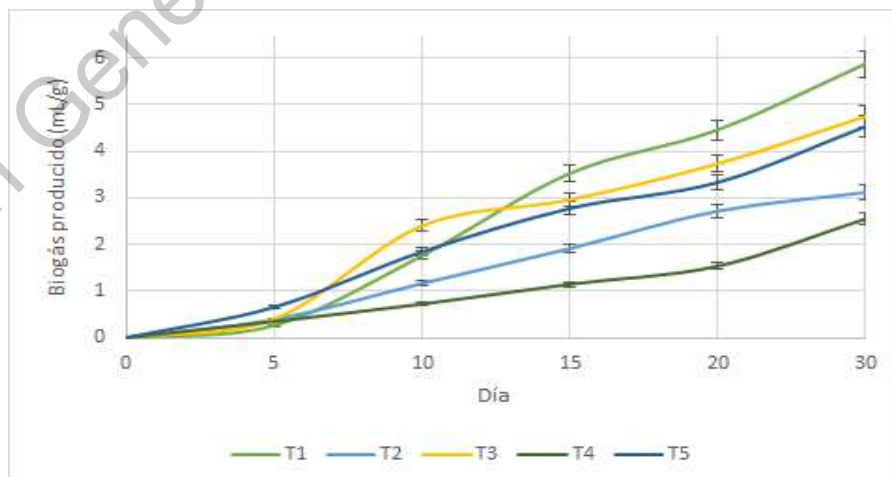


Figura 26. Acumulación de biogás en la producción con mezclas de bagazo de semilla de higuera y heces de cerdo.

El mayor rendimiento acumulado fue para el tratamiento T1, que es el tratamiento con 10% de heces de cerdo, donde se llegó casi a los 6 mL·g<sup>-1</sup>, en el día 30. Los tratamientos T3 y T5, llegaron superar los 4.5 mL·g<sup>-1</sup>, siendo muy superiores a los restantes, pero sin llegar al rendimiento de T1 y siendo estadísticamente distintos a éste pero iguales entre sí. Los tratamientos T2 y T4 fueron los que mostraron una menor cantidad de biogás durante los 30 días de corrida del experimento con valores de 3.1 mL·g<sup>-1</sup> y 2.5 mL·g<sup>-1</sup> respectivamente, teniendo 50% menor rendimiento que los primeros tres tratamientos mencionados y siendo estadísticamente distintos a éstos.

Raheman y Mondal en el 2011, realizaron un experimento donde usaron mezclas de heces de vaca y bagazo de *J. curcas*. En ese trabajo, los menores rendimientos acumulados de biogás fueron obtenidos cuando se usó sólo bagazo o sólo heces de vaca, con alrededor 160 mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales. En cuanto al mayor rendimiento fue obtenido al utilizar un 75% de heces de cerdo con 25% de bagazo de *J. curcas*, alcanzando 200 mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales donde también la relación C/N se ubicó dentro de la idealidad, en un rango de 20:1 y 30:1. Los rendimientos obtenidos en el presente trabajo, comparados con la bibliografía fueron muy inferiores, en el mejor de los casos siendo unas 30 veces menor. Sin embargo, se destaca el mayor rendimiento del tratamiento T3, donde se usaron 5% de heces de cerdo y 5% de bagazo de *R. communis* debido a que su relación C/N estuvo dentro de la idealidad, alcanzando un valor de 5.8 mL·g<sup>-1</sup> de sólidos totales.

6.4 Composta a partir de los residuos de mezclas de bagazo de higuera - heces de cerdo.

Los residuos de sustrato fueron colocados en contenedores distintos, dependiendo de si tenían heces de cerdo, o no, y se dejaron hasta que desprendieron un olor a

tierra mojada, denominado técnicamente preticor. Los datos obtenidos se muestran en el cuadro 14:

Cuadro 14. Compostas obtenidas a partir de los tratamientos de la obtención de biogás.

<b>Tipo de composta</b>	<b>Peso de los residuos secos (g)</b>	<b>Cantidad de suelo añadido (g)</b>	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Peso perdido (g)</b>
Bagazo de higuera	473	1200	1673	1136	537
Bagazo + heces de cerdo	266	750	1016	655	355

Se observó una pérdida de peso de 32.1% para el bagazo de semilla de higuera y 34.9% para la composta hecha a partir de bagazo y heces de cerdo, necesitando también un mayor para la degradación total de los sustratos. La pérdida de peso se pudo deber a los lixiviados ricos en ácidos fúlvicos y húmicos, así como material propio y mineralización de parte del sustrato (FAO, 2019).

## 7 CONCLUSIONES

1. Se logró obtener biogás mediante bagazo de semilla de *Ricinus communis* con rendimiento acumulado máximo de  $5.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales al utilizar 10% de bagazo (relación C/N de 11.47:1 y pH de 5.5).
2. Se obtuvo biogás mediante mezclas de heces de cerdo con bagazo de semilla de *Ricinus communis* con rendimiento acumulado máximo de  $5.8 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  de sólidos totales al utilizar 5% de heces de cerdo y 5% de bagazo.
3. Se obtuvo composta mediante los residuos de la obtención de biogás con bagazo de semilla de higuera y con residuos de heces de cerdo y bagazo de semilla de higuera.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 06(03), 205-212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- Agricultura, O., & de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, O. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores (Vol. 1) [Libro electrónico]. Food & Agriculture Org. <http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf>
- Álvarez, C. (2009, julio-agosto). Biocombustibles: Desarrollo económico - tecnológico. *Economía Informa*, pp. 63–89. Recuperado de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlo salvarez.pdf>
- Aro, E. M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. *Ambio*, 45(1), 24-31.
- Azeredo, L. Z., Gonçalves, R. F., Soares, R. B., & Peterli, Z. (2020). Alternativas de configuración de estaciones de tratamiento asociando reactores UASB y lagunas de alta tasa para la recuperación de energía de aguas residuales. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 6, 287. <https://doi.org/10.30972/eitt.604400>
- Baladhiya, C. S., & Joshi, D. C. (2016). EFFECT OF CASTOR CAKE ON BIOGAS PRODUCTION BY ADDING WITH CATTLE DUNG. *Internacional Journal of Science, Enviroment*, 5(2), 547–551.
- Bardi, U. (2019). Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight?. *Energy Research & Social Science*, 48, 257–261.
- Barik, D., & Murugan, S. (2015). Assessment of sustainable biogas production from de-oiled seed cake of karanja-an organic industrial waste from biodiesel industries. *Fuel*, 148, 25–31.

- Batani, H., & Karimi, K. (2016). Biorefining of *Eruca sativa* plant for efficient biofuel production. *RSC Advances*, 6(41), 34492–34500.
- 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.
- British Petroleum. (2020, 25 septiembre). World Annual Oil Production and Peak Oil. Recuperado 18 de noviembre de 2020, de [https://transportgeography.org/?page\\_id=5944](https://transportgeography.org/?page_id=5944)
- Bustamante, V., Carrillo, A., Prieto, J., Corral, J., & Hernández, J. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5–24.
- Cabra Cendales, T., Meneses Cabezas, D. C., & Galeano Vanegas, N. F. (2016). IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS ASOCIADOS A RESIDUOS DE HIGUERILLA (*Ricinus communis*). *Revista Colombiana de Química*, 44(2), 10-15. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n2.55214>
- Cazier, E. A., Trably, E., Steyer, J. P., & Escudie, R. (2015). Biomass hydrolysis inhibition at high hydrogen partial pressure in solid-state anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 190, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.055>
- CEC (Comisión para la Cooperación Ambiental). (2018). Quema de Leña. Recuperado 15 abril, 2019, de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11474-wood-burning-es.pdf>
- Chandra, R., Vijay, V., Subbarao, P., & Khura, T. (2012). Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes. *Applied Energy*, 93, 148–159.
- Christensen, T. (2011). *Solid Waste Technology and Management (English Edition)* (1.a ed., Vol. 1). Oxford, Inglaterra: Wiley.
- CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos). (2018). *Resolución CNH.E.17.002-18 (CNH.E.17.002-18)*. Recuperado de

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/315165/Resolucion\\_CNH.E.17.002-18.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/315165/Resolucion_CNH.E.17.002-18.pdf)

- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2019). Ricinus communis - ficha informativa. Recuperado 2 marzo, 2019, de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/euphorbiaceae/ricinus-communis/fichas/ficha.htm>
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). (2016). Pobreza 2016 | CONEVAL. Recuperado 2 mayo, 2019, de [https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza\\_2016.aspx](https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2016.aspx)
- Corrales, L. C., Antolínez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>
- Cotana, F., Cavalaglio, G., Nicolini, A., Gelosia, M., Coccia, V., Petrozzi, A., & Brinchi, L. (2014). Lignin as co-product of second generation bioethanol production from ligno-cellulosic biomass. *Energy Procedia*, 45, 52-60.
- Della Vecchia, F. J. (2010, enero). Estudio de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos prioritarios en la Argentina (Tesis de grado). Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Recuperado de <http://ceiba.agro.uba.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18161>
- Deus, N., Vieira, F., Maia, C., Tavares, M., (2010), *Tratamiento químico inactiva alérgenos e toxinas da torta de mamona (Ricinus communis L.)*. I Simposio Internacional de Oleaginosas Energéticas. Joao Pessoa, PB. Brasil. 1922-1926
- Díaz, P. G. (2009). *Potencial productivo de especies vegetales para la producción de insumos bioenergéticos en México*. Documento presentado en Memoria de la 55 Reunión Anual de la Sociedad del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales (PCCMCA), Campeche, México. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v20n01\\_actas.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_meso/v20n01_actas.pdf)

- Escalante-Hernández, H., Castro-Molano, L. D. P., Besson, V., & Jaimes-Estévez, J. (2017). Feasibility of the anaerobic digestion of cheese whey in a Plug Flow Reactor (PFR) under local conditions. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(3), 264-277. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2017.18n3.024>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2011). *Manual de Biogás*. Santiago, Chile: Proyecto CHI/00/32.
- Ferrari, L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. *Revista Mexicana De Física*, 59(2), 36–43.
- Gallert, C., Bauer, S., & Winter, J. (1998). Effect of ammonia on the anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 50(4), 495-501. <https://doi.org/10.1007/s002530051326>
- Garcillán, P. P., y Rebman, J. P. (2016). Nota sobre los primeros registros históricos de dos plantas invasoras en la península de Baja California: crónica del misionero jesuita Miguel del Barco. *Acta botánica mexicana*, 115, 43–49.
- Gavilanes, F. Z., Guedes, C. L. B., Silva, H. R., Nomura, R. G., & Andrade, D. S. (2017). Physic Nut Seed Cake Methanation and Chemical Characterization of Anaerobic Bio-digested Substrate. *Waste and Biomass Valorization*, 10(5), 1267-1276. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0148-y>
- González-Fernández, C., Sialve, B., & Molinuevo-Salces, B. (2015). Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*, 198, 896-906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>
- Grau, M.D. (1999). *Estudio del comportamiento de reactores continuos y semicontinuos: modelización y comprobación experimental* (Tesis de grado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Gupta, A., Kumar, A., Sharma, S., & Vijay, V. (2013). Comparative evaluation of raw and detoxified mahua seed cake for biogas production. *Applied Energy*, 102, 1514–1521.

- Hall, C. A., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141–152.
- Hernández, R. R., & Zamarripa, A. (2013). COMPETITIVIDAD DE LA HIGUERILLA (*Ricinus communis*) PARA BIOCOMBUSTIBLE EN RELACIÓN A LOS CULTIVOS ACTUALES EN EL EDO. DE OAXACA, MÉXICO. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 32, 306–318.
- Hernández-Cervantes, L. (2020, 6 mayo). Reducción de nitrógeno y fósforo en las heces, indicación de uso aprobada por SADER para Stafac500. Recuperado 27 de diciembre de 2020, de <https://www.porcicultura.com/destacado/Reduccion-de-nitrogeno-y-fosforo-en-las-heces-indicacion-de-uso-aprobada-por-SADER-para-Stafac500>
- Ho, D. P., Ngo, H. H., & Guo, W. (2014). A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresource technology*, 169, 742-749.
- Industrial Technology Research Institute. (2019). Innovative UASB Reactor. <https://www.itri.org.tw/english/Innovative-UASB-Reactor?CRWP=1070562721270263620>
- INFOPOS (Instituto de la Potasa y Fósforo). (1997). *Manual internacional de fertilidad de suelos* (Ed. rev.). México D.F., México: INFOPOS.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía & Besel. (2007). Biomasa (1.a ed., Vol. 1). Recuperado de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Digestores\\_Anaerobios\\_A2007\\_0d62926d.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf)
- Isici, A., & Demirer, G. (2007). Biogas production potential from cotton wastes. *Renewable Energy*, 32(5), 750–757.
- Jabłoński, S. J., Biernacki, P., Steinigeweg, S., & Łukaszewicz, M. (2015). Continuous mesophilic anaerobic digestion of manure and rape oilcake – Experimental and modelling study. *Waste Management*, 35, 105–110.

- Jabłoński, S. J., Kulażyński, M., Sikora, I., & Łukaszewicz, M. (2017). The influence of different pretreatment methods on biogas production from *Jatropha curcas* oil cake. *Journal of Environmental Management*, 203, 714–719.
- Jiménez, R., Rodríguez, J. A., Ruiz, L. A., Mateos, J. C., & Rosales, R. (2013). *Detoxificación de pastas de higuera y jatropha*. Folleto técnico (Ed. rev.). México D.F., México: INIFAP.
- Kerimova, O., & Batoudaki, T. (2016, 16 marzo). Are Mexico's 2015 discoveries enough to impede production decline? Rystad Energy, 1(April). Recuperado de <https://www.rystadenergy.com>
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. S. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1821-1830. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.024>
- Luo, G., Talebnia, F., Karakashev, D., Xie, L., Zhou, Q., & Angelidaki, I. (2011). Enhanced bioenergy recovery from rapeseed plant in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 102(2), 1433–1439.
- Makkar, H. P. S.; V. Kumar; K. Becker. 2012. Use of detoxified jatropha kernel meal and protein isolate in diets of farm animals. In: H. P. S. Makkar (ed.). *Biofuel co-products as livestock feed – Opportunities and challenges*. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Rome, Italy. pp. 351-378.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Minor, E. E., & Lima, M. (2012). La utilidad de la información estadística oficial en la medición de la pobreza en México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 3(1), 14–23.
- Moraes, B. S., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 888-903.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>

Morales-Maldonado, E. R., Trejo-Lizama, W., Santos-Ricalde, R. H., & Bacab-Pérez, H. M. (2012). Caracterización química de excretas de cerdo secas y maduras provenientes de tres niveles de energía. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 3(15), 567-573. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/309385101\\_Caracterizacion\\_quimica\\_de\\_excretas\\_de\\_cerdo\\_secas\\_y\\_maduras\\_provenientes\\_de\\_tres\\_niveles\\_de\\_energia](https://www.researchgate.net/publication/309385101_Caracterizacion_quimica_de_excretas_de_cerdo_secas_y_maduras_provenientes_de_tres_niveles_de_energia)

Murphy, D. J., Hall, C. A., Dale, M., & Cleveland, C. (2011). Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels. *Sustainability*, 3(10), 1888–1907.

Naturalista. (2019). Higuera ( *Ricinus communis* ). Recuperado 5 abril, 2019, de <https://www.naturalista.mx/taxa/56739-Ricinus-communis>

NMX-AA-034-SCFI-2015. *Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba*. Diario Oficial de la Federación, México, 2015.

NMX-AA-16-1984. *Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad*. Diario Oficial de la Federación, México, 2015.

NMX-AA-18-1994. *Protección al ambiente - Contaminación de suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de cenizas*. Diario Oficial de la Federación, México, 1984.

NOM-021-RECNAT-2000. *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación, México, 31 de diciembre de 2002.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. *Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Diario Oficial de la Federación, México, 2 de marzo de 2007.



- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2016). *Acuerdo de París*. Documento presentado en COP 21, París, Francia. Recuperado de [https://unfccc.int/sites/default/files/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s. f.). Biodigestores: Transformar la biomasa en biogás. Recuperado 12 de noviembre de 2020, de [http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/06Biodigestores\\_hojaTecnica.pdf](http://www.probiomasa.gob.ar/pdf/06Biodigestores_hojaTecnica.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores (Revisado ed., Vol. 1). Buenos Aires, Argentina: Food & Agriculture Org.
- Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellon, L. F., & Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(1), 31-42. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2017.18n1.003>
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n2a13>
- Pavlostathis, S., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment. *Water Science and Technology*, 24(8), 35–59.
- Petrozzi, A., Cavalaglio, G., Coccia, V., Nicolini, A., Barbanera, M., & Cotana, F. (2016). Energy Enhancement of the Residues from the Cardoon Seeds Milling: Preliminary Experimentation in a Small Size Biogas Plant. *Energy Procedia*, 101, 440–447.
- Ponce, S. B. (1984). Cultivo del higuierillo. *Revista cafetera*, 245, 6–12.
- Portales, R. (2011, 29 noviembre). REACTOR ANAEROBIO DE CONTACTO Y PRODUCCION DE BIOGAS. *Agua & Medio Ambiente*. <http://agua-medioambiente.blogspot.com/2011/11/reactor-anaerobio-de-contacto-y.html>
- Raheman, H., & Mondal, S. (2012). Biogas production potential of jatropha seed cake. *Biomass and Bioenergy*, 37, 25–30.



- Ramos, M. A., González, M. M., Cárdenas, N. C., Zavala, M. A., & Pérez, S. (2012). Activity of the main fatty acid components of the hexane leaf extract of *Ricinus communis* against *Spodoptera frugiperda*. *African Journal Of Biotechnology*, 11(18), 4274–4278.
- Rapier, R. (2016, 8 septiembre). What Hubbert Got Really Wrong About Oil. Recuperado 28 marzo, 2019, de <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2016/09/08/what-hubbert-got-really-wrong-about-oil/>
- REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía). Biogás. Consultado el 6 de febrero de 2019. Biogás. <http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biogas/>
- Reyes Aguilera, E. A. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 1(24), 60-81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina [Epub] (Vol. 1). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2017. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Bioenergéticos mexicanos. Consultado el 6 de febrero de 2019. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial-Bioenerg\\_ticos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial-Bioenerg_ticos.pdf)
- Sánchez, L. (2011). Veinte años de la dendroenergía en México. Documento presentado en XXIV Reunión Científica, Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Veracruz y III del Trópico Mexicano, Xalapa, Veracruz. Recuperado de [https://www.uv.mx/apps/agronomia/dendro\\_2011/](https://www.uv.mx/apps/agronomia/dendro_2011/)
- Sarabia, M. A., Laines, J. R., Sosa, J. A., & Escalante, E. (2017). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE EXCRETAS DE BORREGO Y RUMEN ADICIONADAS CON LODOS PROCEDENTES DE

UNA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 109–116.

Secretaría de Energía. (2020, 7 febrero). ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. Recuperado 24 de septiembre de 2020, de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5585823&fecha=07/02/2020)

Serrano-Medrado, M., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Fuelwood use patterns in Rural Mexico: a critique to the conventional energy transition model. *Historia Agraria. Revista de agricultura e historia rural*, 1(77), 81-104. <https://doi.org/10.26882/histagrar.077e04s>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017). Higuierilla. Recuperado 6 febrero, 2019, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/272550/higuierilla\\_monografia.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/272550/higuierilla_monografia.pdf)

Singh, A., Olsen, S. I., & Nigam, P. S. (2011). A viable technology to generate third-generation biofuel. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(11), 1349-1353.

Smith, K. R. (2013). El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. Recuperado 2 mayo, 2019, de <http://www.fao.org/3/a0789s/a0789s09.htm>

Social Watch. (2016). *Spotlight Report 2016 Mexico*. Recuperado de <http://www.socialwatch.org/sites/default/files/2016-SR-MEXICO-esp-completo.pdf>

Varnero, M., Arellano, J. (1991). Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura. Informe Técnico. Santiago, Chile: *Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*.

Varnero, M.T. 1991. Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile: *Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*.

Vera, I., Estrada, M., González, G., Tejeda, M., López, X., & Ortiz, A. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, XVIII(3), 307–320.

Villas, A., & Ingouville, S. (2019, 25 junio). Guía de Compostaje. Recuperado 27 de diciembre de 2020, de <https://puntocompost.wordpress.com/productos/>

Dirección General de Bibliotecas de la UAG