

## Producción y reto logístico del biogás a partir del nopal (*Opuntia Ficus-Indica*)

Emanuel Sánchez Belmonte, Edgar Vega Chacón y Cesar Ricardo Arias Navarrete

Universidad Vasco de Quiroga, Morelia, Michoacán, México. [esanchez303@uvaq.edu.mx](mailto:esanchez303@uvaq.edu.mx), teléfono: +52 443 173 7373; [evega604@uvaq.edu.mx](mailto:evega604@uvaq.edu.mx), teléfono: +52 443 368 2152; [cariasn@uvaq.edu.mx](mailto:cariasn@uvaq.edu.mx), teléfono: +52 55 2055 2519.

**Energías Renovables (Biomasa). Ponencia Presencial.**

Recibido: 16 de junio de 2023

Aceptado: 5 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

**Resumen:** La biomasa es un importante precursor de la explotación de fuentes renovables para la producción de energía. Se entiende por biomasa cualquier materia prima de origen animal o vegetal que estuvo recientemente viva, y cuyos procesos naturales (metabolismo, oxidación, fermentación) pueden ser aprovechados para generar calor, electricidad o movimiento. La propuesta consiste en impulsar el uso de biomasa vegetal obteniendo así un combustible eficiente y económico, siendo *Opuntia Ficus-Indica* la materia prima, que cuenta con un bajo pH (en comparación con otras biomásas), requiere poco cuidado, y es relativamente fácil de producir en grandes volúmenes, contando ya con un elevado potencial energético. Se propone purificar el gas para así obtener un gas enriquecido de hasta con un 95% de Metano ( $CH_4$ ), habiendo depurado principalmente dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y Agua ( $H_2O$ ), con un mínimo restante de otros compuestos. El foco de la propuesta consiste en el licuado del biogás mediante el proceso de criogenización, requiriendo menor espacio de almacenamiento y facilitado el transporte, permitiendo movilizar 0.6 m<sup>3</sup> de biogás por cada litro de licuado, optimizando el espacio y aumentando su eficiencia energética. El biogás tiene un poder calórico de 5,500 kcal/m<sup>3</sup>, menor que el gas natural (10,440 kcal/m<sup>3</sup>) y el GLP (aprox 22,000 kcal/m<sup>3</sup>) pero se ve compensado por su impacto ambiental cercano a 0; mejorando la calidad de vida de las personas y protegiendo los ecosistemas del territorio mexicano, su accesibilidad, la posibilidad de generar más empleos y una importante contribución a la economía del país. Tras el análisis de mercado del Nopal *Opuntia Ficus-Indica* se llegó a la conclusión de que es más eficiente el uso de este, en comparación con sus homólogos, altamente utilizados, los rastrojos de maíz, trigo y cebada comparando el precio, potencial energético y pH.

**Palabras clave:** Biogás; Biomasa; Energía; *Opuntia Ficus-Indica*; Logística; Nopal.

## Production and logistical challenge of biogas from prickly pear cactus (*Opuntia Ficus-Indica*)

**Abstract:** Biomass is a significant precursor to the exploitation of renewable sources for energy production. Biomass refers to any raw material of animal or plant origin that was recently alive and whose natural processes (metabolism, oxidation, fermentation) can be harnessed to generate heat, electricity, or motion. The proposal aims to promote the use of plant biomass, thus obtaining an efficient and cost-effective fuel, with *Opuntia Ficus-Indica* as the raw material. This biomass has a lower pH compared to others, requires little care, and is relatively easy to produce in large volumes, already possessing high energy potential. The idea is to purify the gas to obtain an enriched gas with up to 95% Methane ( $CH_4$ ), primarily removing carbon dioxide ( $CO_2$ ) and water ( $H_2O$ ), with minimal remaining of other compounds. The main focus of the proposal lies in liquefying the biogas through the cryogenic process, requiring less storage space and facilitating transportation, allowing the movement of 0.6 m<sup>3</sup> of biogas per liter of liquefied gas, optimizing space, and increasing its energy efficiency. Biogas has a calorific value of 5,500 kcal/m<sup>3</sup>, lower than natural gas (10,440 kcal/m<sup>3</sup>) and LPG (approximately 22,000 kcal/m<sup>3</sup>), but it is compensated by its close-to-zero environmental impact. This improves the quality of life for people and protects the ecosystems in the Mexican territory, providing accessibility, the possibility of creating more jobs, and making a significant contribution to the country's economy. After analyzing the Nopal *Opuntia Ficus-Indica* market, it was concluded that its use is more efficient compared to its highly utilized counterparts, such as corn, wheat, and barley straw, considering price, energy potential, and pH.

**Keywords:** Biogas; Biomass; Energy; *Opuntia Ficus-Indica*; Logistics; Prickly pear cactus.

### Introducción

Según Vega & Ramírez (2014) “Se entiende por biomasa a ‘el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de esta’... “.

A partir de la biomasa se pueden obtener “biocombustibles”; en forma líquida (Biodiesel, Bioalcoholes), gaseosa (Biogás) y sólida (Pellets, briquetas, carbón vegetal, leña), siendo el resultado de procesos naturales como lo son la

fotosíntesis y la oxidación de la biomasa. En resumen, se aprovecha la energía proveniente del sol, que se metaboliza a través de la cadena trófica en forma de hidratos de carbono (HC), es decir, la transformación de moléculas de  $CO_2$  y  $H_2O$ , en  $CH_2O$  ("Carbono orgánico") y  $O_2$  (Vega & Ramírez, 2014).

Según Díaz (2015) "Una primera estimación, la cantidad de energía almacenada en nuestro planeta en formato biomasa puede ascender a unos 800 Gtep con una producción específica anual de 75 Gtep. Y ese remanente de energía ¿qué representa en términos relativos? La última cantidad es, grosso modo, 9 veces el consumo actual de energía mundial".

Se conoce que, al formar parte del ciclo natural del carbono, la energía que es generada a partir de la biomasa posee un impacto ambiental prácticamente nulo, puesto que, a través del proceso de combustión, se oxida la biomasa liberando así el  $CO_2$  que absorbió por medio de la fotosíntesis para su desarrollo.



Este proceso cíclico es considerablemente una alternativa superior al uso de hidrocarburos, puesto que la excesiva liberación de  $CO_2$  de estos es altamente desproporcionada a su tiempo de formación, generando un desequilibrio en la cantidad de  $CO_2$  (GEI) en la atmósfera, ergo, deterioro medioambiental.

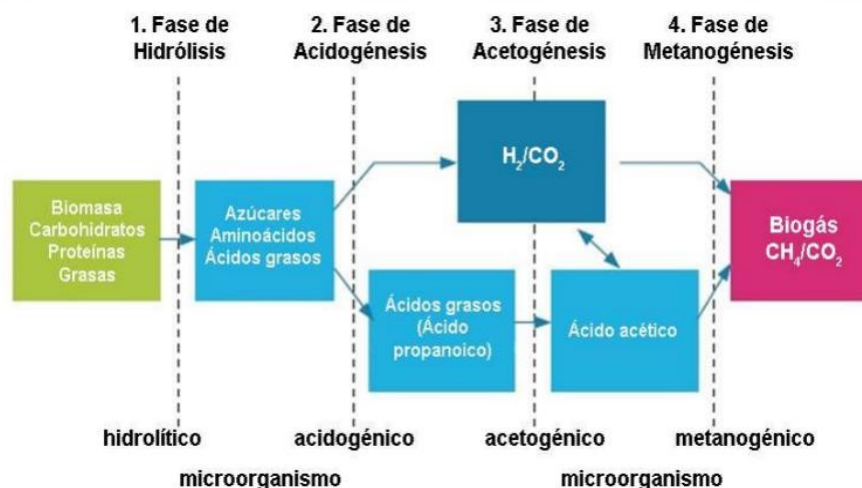


Figura 1. Proceso de la digestión anaerobia.

La producción de biogás se da por la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) por parte de bacterias "cetogénicas, homoacetogénicas y metanogénicas"; este proceso se lleva a cabo dentro de un sistema cerrado, conocido como biorreactor o biodigestor.

Posteriormente, el biogás se aprovecha para la combustión, generando energía térmica, que a su vez; gracias a la implementación de motores, puede ser transformada en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica (González, 2009).

El biogás busca ser el sustituto directo del Gas Licuado de Petróleo (GLP), presentando tanto ventajas; menor precio (12 pesos por litro) y un menor impacto ambiental, como desventajas; menor poder energético y un periodo más largo de producción. No cabe duda del gran potencial de la biomasa como fuente de energía, no obstante, dicho potencial puede verse mermado por prácticas ineficientes de logística, como lo es su transporte.

Para esta investigación, se plantea impulsar el aprovechamiento de *Opuntia Ficus-Indica* (*Opuntia* o Nopal común); cactácea que abunda en gran parte del territorio mexicano. La explotación de esta especie parece ser de gran conveniencia debido a que presenta una alta resistencia a condiciones adversas durante su cultivo y desarrollo, como suelos pobres y poco riego, en contraste a otros tipos de materia prima dirigidos a la producción de biogás.

En cuestión de accesibilidad, una de las ventajas que existen detrás del uso del nopal es su pertenencia a la familia de las CAM, estas se caracterizan por llevar a cabo “fotosíntesis oscura”; metabolización de los HC por la noche, por lo que es recomendable que estas se planten de manera masiva en camellones y azoteas (Aké, 2017).

El nopal es una de las especies más importantes y endémicas de la república mexicana; sobre todo para el centro y el altiplano del país, siendo que su volumen de producción como cultivos energéticos es muy alto, comparable con la producción de jatrofa, caña de azúcar, maíz entre otros. Se calcula que la superficie plantada en México es de 12,500 hectáreas con una producción aproximada de 100 ton/ha (John Deere, 2019). En la Tabla 1 se exponen los precios de algunos de los tipos de biomasa más utilizados para la producción de biocombustibles en comparación del nopal.

Tabla 1. Precio por kilogramo de biomasa

Tipo de rastrojo	Precio por kg en pesos mexicanos
Trigo	10
Maíz	10
<b><i>Opuntia Ficus-Indica</i></b>	
Nopal	8

Entre las ventajas del cultivo a gran escala destacan: prevención de la erosión, bajo costo de producción, alto nivel de absorción de  $CO_2$  atmosférico y una fuerte resistencia a climas adversos: como la extrema sequía.

Cabe mencionar que su baja demanda de recursos y/o cuidados se ve altamente potenciada por su gran aportación nutrimental y energética.

Según (John Deere, 2019) “Aproximadamente el 90% de la biomasa del nopal se puede transformar en biogás, y el 10% restante se transforma en sedimento y es arrastrado con agua que liberan las células de los nopales...” También se menciona que: “la productividad energética del nopal depende del rendimiento del biogás, su contenido de metano y el rendimiento del cultivo (ton/ha). En el laboratorio del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se ha producido lo equivalente a 30 y 40  $m^3$  de biogás/ton de nopal fresco. En la planta de Nopalimex en Zitácuaro, Michoacán, se obtiene más del 70% de gas metano, del biogás, con una productividad de 100  $m^3$  de biogás por tonelada de nopal”. En la Tabla 2 se expone el poder calorífico de algunos tipos de biomasa más empleados para la producción de biogás en comparación del nopal.

Tabla 2. Comparación del poder calorífico neto de distintos tipos de biomasa.

Tipo de rastrojo	PCN (MJ/kg)
Trigo	16.1
Cebada	16.6
Maíz	16.2
<b><i>Opuntia Ficus-Indica</i></b>	
Nopal	17.064

El nopal cuenta con un periodo de descomposición aproximadamente 5 a 10 veces menor que el de la biomasa animal, que es la que se aprovecha mayormente para producir biogás, esto implica que la eficiencia del biodigestor puede llegar a ser 5 a 10 veces mayor. El biogás está compuesto principalmente por metano, no obstante, también contiene

otros compuestos como  $CO_2$ ,  $H_2O$  y  $H_2S$  (Ácido sulfhídrico), este último al entrar en combustión libera  $SO_2$  (Óxido de azufre) y  $H_2SO_4$  (Ácido sulfúrico); responsables del fenómeno de la lluvia ácida. Por otro lado, el biogás producido del nopal no emite dichos contaminantes, disminuyendo el costo de producción al omitir los procesos de filtrado de los mismos. (Méndez et al, 2009).

Otro aspecto destacable del biogás producido a partir de *Opuntia Ficus-Indica* es el nivel de pH, alcanzando un rango de 6.5 – 6.8 (levemente ácido), contrastando con la producción a derivada de otros tipos de biomasa, como maíz o estiércol, que alcanzan un pH de hasta 7.5. El rango de pH que brinda el nopal hace posible mantener una producción eficiente de metano reducir el costo del biodigestor, al no requerir de materiales o recubrimientos con tolerancia a un pH más ácido, y facilitar los procesos de mantenimiento y limpieza del mismo. Por otro lado, las líneas de diseño implementadas son con equipos adquiribles en el mercado industrial local y de uso corriente (Aguilera, 2016).

El resultado de la digestión de nopal para la producción de biogás según (John Deere, 2019) “genera sedimento orgánico y agua como subproductos, los cuales pueden ser tratados mediante lombricultura y así obtener humus para su incorporación al suelo y nutrición de los cultivos. El agua nitrogenada obtenida del reactor puede ser incorporada nuevamente en las plantaciones de nopal como fertilizante reinyectado en el sistema de riego tecnificado”.

Biogás: El biogás es producto de una serie de reacciones químicas acetogénicas y metanogénicas, producidas por una familia de bacterias llamada “archeas”.

Este tipo de procesos requieren de condiciones muy específicas en las que se destacan una temperatura regulada, puesto que, a mayor temperatura, más rápido se da el proceso de digestión (Martí, 2008). En la Tabla 3 se muestra la temperatura y tiempo de retención recomendados para optimizar la producción de biogás, dependiendo de la región en la que se localice la planta.

Tabla 3. Temperatura y tiempo necesarios para una óptima producción de biogás según su región.

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (Días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Cabe mencionar que, para que se pueda producir el biogás de manera adecuada, el método de preparación de la biomasa debe ser muy específico; es necesario que el proceso de producción del biogás sea de carácter anaeróbico (En ausencia de oxígeno). La biomasa debe pasar por un previo pretratamiento (físico, químico o biológico) para la eliminación de la pared celular; aprovechando en mayor manera su contenido energético, posteriormente se mezcla con agua para provocar la hidrólisis de la biomasa; transformando los HC en sustancias más simples, facilitando el metabolismo de los diferentes tipos de bacterias que participan en la fermentación (cetogénicas, heteroacetogénicas y metanogénicas). Tras el proceso de fermentación, el biogás obtenido puede ser destinado a la generación de calor, cocción de alimentos, sistemas de refrigeración y aire acondicionado, y generación de energía eléctrica (a través de motores de combustión) (Martí, 2008).

Uno de los beneficios de los biodigestores es que, cuando la materia orgánica es descompuesta, dependiendo de la cantidad de tiempo que esté dentro del biodigestor se genera un residuo; que puede ser mayormente líquido o sólido el cual sirve como un excelente abono orgánico llamado Biól, que está compuesto por nitrógeno del 2 al 3%, fósforo del 1 al 2%, potasio 1% y en torno a un 85% de materia orgánica con un pH de 6.5-7.5 (dependiendo de la materia orgánica) (Martí, 2008).

Se pretende eficientar la logística por medio del transporte de este gas de forma líquida reduciendo el espacio mínimo requerido para poder manejar este gas.

El procesamiento consiste en la transformación de 600 L biometano gaseoso a 1 L es muy complejo, ya que requiere de la compresión y una disminución de la temperatura hasta  $-162^{\circ}$ . Gracias al proceso de licuefacción se puede aprovechar en gran medida el poder calorífico del biometano, así mismo el espacio ahorrado. (Méndez et al, 2009).

Esto abre una gran rama de oportunidades en el sector de transporte pues se puede distribuir ya sea por vía terrestre, marítima o aérea un volumen elevado de gas, convirtiéndose en un combustible más eficiente.

Un reto importante en el tratamiento del biogás, justamente, es la licuefacción de este, requiriendo de un proceso de filtrado para posteriormente ser sometido a altas presiones y a bajas temperaturas. Los procedimientos comúnmente utilizados varían dependiendo de cuán puro se busque tener el metano, así como la cantidad de recurso disponible para este tratamiento.

Para conseguir un gas enriquecido es necesario filtrar el  $CO_2$  por medio de cuatro principales procesos:

- **Adsorción:** A elevadas presiones por medio de reacciones electroquímicas, algunas moléculas suelen verse fuertemente atraídas a ciertos materiales; como las zeolitas, carbón activado, filtros moleculares de zeolitas y filtros moleculares de carbón activado, dando como resultado un elevado porcentaje de filtración y por ende un gas altamente enriquecido.
- **Absorción:** Lavado del biogás a través de una columna con un flujo constante de agua; cuya temperatura puede ir desde los  $5-25^{\circ}C$ , que desaloja una alta cantidad de  $CO_2$  alcanzando hasta un 95% de pureza. Durante este proceso pueden ser empleados solventes químicos para aumentar la eficiencia, no obstante, conlleva grandes costos e impacto ambiental.
- **Mineralización:** Se lleva a cabo una mezcla de  $CaO$  (cal viva) y el  $CO_2$  del biogás. Este es un proceso muy costoso, además de un alto impacto en la atmósfera pues la cal viva en su cocción emite cantidades muy altas de  $CO_2$ .
- **Proceso de criogenización:** Este se da por medio de elevar la presión a 50 bar donde el  $CH_4$  es líquido a  $-80^{\circ}C$  y el  $CO_2$  es líquido a  $15^{\circ}$  por lo que mientras que el  $CH_4$  se mantiene gaseoso el  $CO_2$  se puede filtrar. Un gran inconveniente de este procedimiento es que es costoso porque requiere mucha electricidad. (Varnero, 2011) (Figura 2).

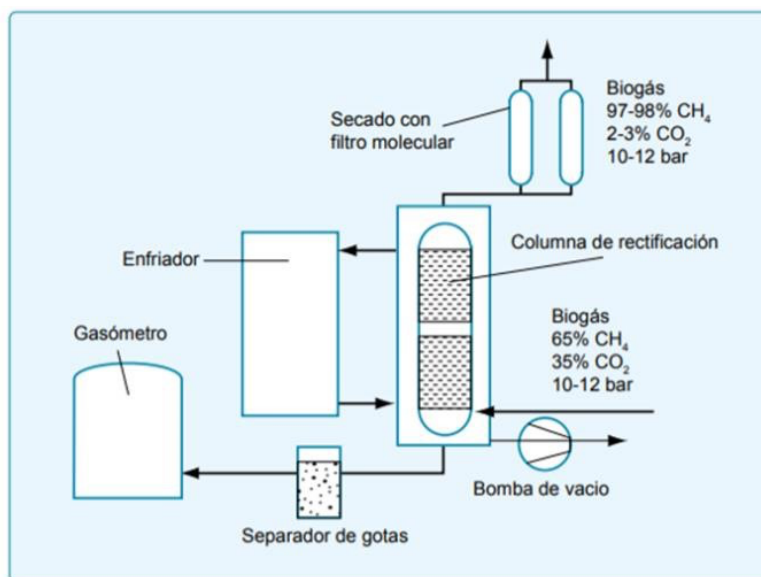


Figura 2. Proceso de purificación del biogás

El objetivo de este proyecto es el plantear o difundir una manera viable de sustituir parcial o totalmente el uso de combustibles de origen fósil, resaltando de igual manera la importancia del cuidado de los ecosistemas del planeta, así como sus recursos.

## Materiales y Métodos

Una vez abordados los conceptos necesarios para el desarrollo del presente documento, a través de una investigación de carácter bibliográfico, se procede a describir de manera teórica los parámetros para la optimización de la logística del biogás producido a partir de *Opuntia Ficus-Indica*.

#### *Procesamiento del biogás para su almacenamiento:*

Una vez completado el proceso de producción de biogás, este puede ser recolectado y almacenado, sin embargo, la etapa de almacenamiento puede llegar a presentar dificultades debido a que el biogás necesita ser comprimido. Una alternativa que es bastante efectiva para el transporte del biogás es de manera líquida.

El proceso de filtrado requiere de varias etapas, debido a que el metano obtenido se encuentra mezclado con  $CO_2$  y  $H_2O$ , reduciendo su eficiencia energética. De igual manera el  $H_2O$  puede generar escarchamiento, que obstruye, oxida y daña los componentes del sistema.

La primera etapa es la remoción del  $H_2O$  aplicando un proceso de condensación que emplea un intercambiador de calor; cuya temperatura por lo regular es de  $0^\circ$ , el biogás fluye por este intercambiador donde, gracias a la baja temperatura de las paredes, el agua almacenada en el biogás se condensa en forma de gotas, dejando así el gas seco (Admin, 2022).

Según (Varnero, 2011) "Al momento de salir del digester, generalmente, el biogás se satura con vapor. El biogás debe tener una humedad relativa inferior a 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte. Este condensado, particularmente en combinación con otras impurezas, puede corroer las paredes de las tuberías. Frecuentemente, el biogás debe ser secado antes de ser purificado".

El biogás debe de tener por lo menos un 95% de  $CH_4$  (metano) para considerarse un gas enriquecido (Varnero, 2011).

#### *Licuefacción:*

Aplicando este proceso es posible facilitar la logística del producto, como se abordó en la introducción, la capacidad de comprimir 600 L a 1 L de biometano es sin duda una gran ventaja. Sin embargo, esto deriva en el incremento del costo al requerir una temperatura tan baja, además de los gastos requeridos para soportar la operación y los recipientes con las condiciones requeridas, los últimos teniendo un valor aproximado de 20mil MXN (Aburto, 2009).

Cabe recordar que el aumento del costo del almacenamiento del biogás puede verse compensado por la accesibilidad de *Opuntia Ficus-Indica*, además como esta no produce ácido sulfhídrico se pueden omitir algunos procesos de filtrado. De igual forma se reduce el costo del refuerzo específico del biodigestor para el pH ácido de materia orgánica procedente de la descomposición de heces fecales animales, cuyo pH es más alto (John Deere, 2019).

Para mantener una temperatura óptima al momento de almacenar el biogás es necesaria la implementación de recipientes que cuenten con un sistema de retroalimentación térmica, similar a un sistema de refrigeración por combustión, además de un aislamiento térmico. Esto permite mitigar la cantidad de biogás evaporado durante el almacenamiento y traslado. (Rillo et al, 2017).

## **Resultados y Discusión**

Tras el proceso de investigación se obtuvieron datos prometedores sobre *Opuntia Ficus-Indica*, que la vuelven un excelente candidato para la producción de biogás. Siguiendo el orden de la investigación lo primero que hay que analizar son los precios de la materia prima. En la Tabla 1 se expone el precio de venta del nopal en comparación al de otros tipos de biomasa. Se puede apreciar una diferencia de 2 pesos mexicanos, en promedio, por 1 kg de biomasa con respecto al rastrojo de trigo y de maíz que son regularmente utilizados por su baja utilidad en el sector agricultor. Cabe mencionar que el precio de venta suele variar dependiendo del productor.

Una vez analizado el costo en MXN procedemos a analizar el potencial energético que tiene el nopal para poder establecer una postura sobre si vale la pena usar nopal en cuestión precio/energía.

En la Tabla 2 se presenta la potencia energética del nopal, expresada en MJ/Kg (Megajulios por Kilogramo de biomasa), en comparación de los rastrojos anteriormente mencionados. Esto se traduce como la cantidad de energía obtenida por kilogramo de biomasa. Permitiendo observar que en comparación con los rastrojos de trigo, cebada y maíz que son de los más utilizados como biomasa, el nopal les lleva una significativa ventaja en lo que refiere a potencial energético.

En la producción de biogás es de suma importancia conocer los parámetros de pH en los que es ideal la producción de este combustible. En la Tabla 4 podemos observar los rangos de pH y su orden respectivamente.

Tabla 4: Rangos de pH y pH ideal de *Opuntia Ficus-Indica*.

Parámetros de pH	
Cultivos acidogénicos	5.5 - 6.5
Cultivos metanogénicos	7.8 - 8.2
pH de nopal	
Analizado	6.5 - 6.8

Los cultivos acidogénicos son aquellos con un pH más bajo, como se ve en la Tabla, resultando en una poca concentración de metano. Los metanogénicos van desde 7.8 hasta 8.2 los cuales favorecen a una mayor concentración de metano y menos impurezas del biogás.

Comparando los datos anteriores y tomando en cuenta que el pH de *Opuntia Ficus-Indica* es de 6.5 - 6.8, un punto medio de los anteriores, esta es ideal para una producción controlada de metano. : La Figura muestra la producción de  $CH_4$  como de  $CO_2$  dependiendo del nivel de pH de la biomasa utilizada para producir biogás.

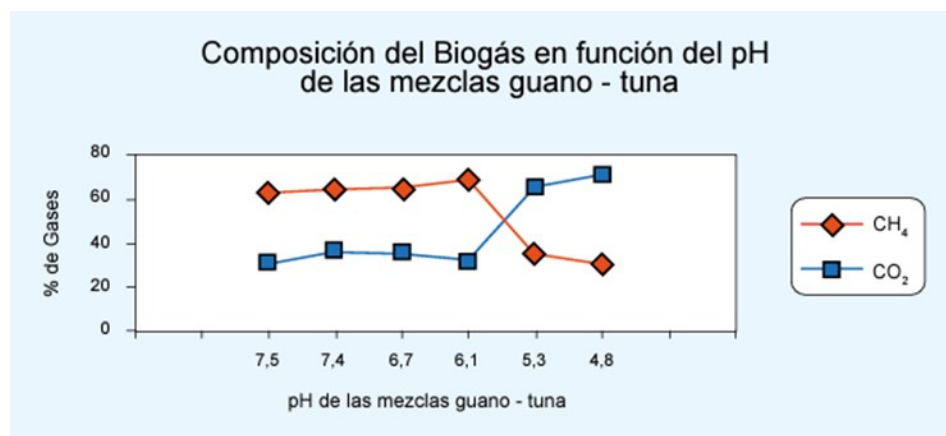


Figura 3. Producción de  $CH_4$  y  $CO_2$  dependiendo del nivel de pH (Varnero, 2011).

Los datos recopilados resultan ser muy prometedores, puesto que el optar por *Opuntia Ficus-Indica* como principal materia prima, ayuda a mitigar el costo de los procesos de producción y almacenamiento requeridos para lograr una mayor eficacia.

La Tabla 5 muestra la comparación entre el costo del GLP y el costo final obtenido del gas metano licuado, se observa como el costo de producción es significativamente mayor, sin embargo, cabe recordar que un solo litro de metano licuado equivale a 600 litros de metano en estado gaseoso y, tomando en cuenta que aproximadamente un litro de GLP tiene un poder calorífico comparable al de 2 litros de gas metano, se estima que el poder calorífico de un litro de metano líquido equivale al de 300 litros de GLP.

En la Tabla 5 no se toman en cuenta el precio del transporte por gasoducto, camión cisterna o buque metanero, por lo que aún habría que añadir transporte, merma, ganancia y alzas y bajas del mercado para determinar el costo real.

Tabla 5. Costo Total por Litro de LBG en comparación del GLP y el GNC

LBG (Biogás licuado)	GLP (Gas licuado de petróleo)	GNC (Gas Natural Comprimido)
55.2 - 60.5 MXN	10.95 MXN	12.00 MXN

\* El precio del BGL por litro considera el precio del nopal y del gas licuado.

Cómo puede observarse, la producción de LBG requiere de una inversión importante, de cara al costo total, sin embargo, como exponen los autores consultados, la facilidad de producción y recolección de *Opuntia Ficus-Indica*, sumado a sus ventajas durante el proceso de producción podrían llegar a amortiguar dicha inversión. De esta forma se puede asegurar la eficacia de *Opuntia Ficus-Indica* como fuente de bioenergía.

## Conclusiones

Después de realizar la investigación y analizar los resultados determinamos que la biomasa de *Opuntia Ficus-Indica* es altamente competente para la producción de biogás, puesto que su rango de pH y la ausencia de ácido sulfhídrico permiten que este sea más sencillo y económico, compensando el aumento del costo de filtración y almacenamiento. Además, la gran capacidad que tiene *Opuntia Ficus-Indica* de resistir condiciones muy adversas vuelven muy fácil y económico su cultivo en masa, ergo, un enorme potencial como generador de empleo y desarrollo económico.

La transformación energética que se busca lograr en la agenda 2030 puede verse impulsada de manera significativa a través del aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía, pudiendo convertir a los Estados Unidos Mexicanos en un gran pilar, sino es que en el más grande, en la producción de biocombustibles.

Sin dudas tenemos al alcance de nuestras manos un agente que podría cambiar por completo el curso de las energías renovables en su lucha en contra del cambio climático, mejorando la calidad de vida de muchas personas en todo el mundo y conducir nuestro país hacia un prometedor futuro como posible potencia mundial.

**Agradecimientos y financiamiento:** Agradecemos enormemente a nuestros docentes, quienes fueron de gran apoyo durante el desarrollo del presente documento, al maestro César Ricardo Arias Navarrete, al doctor Juan Rogelio Tena García y a la doctora Marcela Esmeralda Sarabia Ochoa como principales supervisores del proyecto y también a nuestras familias por su inconmensurable apoyo y cariño. Finalmente un agradecimiento muy especial a nuestra compañera Paola Martínez Santillán, quién por condiciones fuera de su control no pudo ser partícipe de este proyecto.

## Bibliografía

- Aburto, A. (2009). La licuefacción de los gases o hacia las bajas temperaturas. *Ciencias*, (082).
- Aké, A. 2017. "Biogás con nopal para vehículos, en sustitución de combustibles fósiles" (1ª ed.).
- Aguilar Sánchez, D., & Sánchez Salazar, M. T. (2022). La organización territorial de la producción de nopal verdura en Tlalnepantla, Morelos. *Investigaciones geográficas*, (108).
- Aguilera, E. A. R. (2016). Producción de biogas a partir de Biomasa. *Revista Científica de FAREM-Esteli*, (17), 11-22. <https://rcientificaesteli.unan.edu.ni/index.php/RCientifica/article/view/1419>
- Arreguin, J., Ramos, M., Carapia, I., & Lezama, P. (2016). Obtención de biogás a base de biomasa de nopal a nivel laboratorio (*Opuntia ficus-indica*) variedad Atlixco. *Experimentales*, 37. [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas\\_Experimentales/vol3num6/Revista\\_Sistemas\\_Experimentales\\_V3\\_N6\\_5.pdf](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num6/Revista_Sistemas_Experimentales_V3_N6_5.pdf)
- Brito, D. L., Littlejohn, W. L., Rosellón, J. (1999). DETERMINACIÓN DE LOS PRECIOS DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN MÉXICO. *El Trimestre Económico*, 66(264(4)), 763–780. <http://www.jstor.org/stable/20857006>
- de Jesús Méndez-Gallegos, S., Rössel, D., Amante-Orozco, A., Gómez-González, A., & García-Herrera, J. E. (2009). EL NOPAL EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCMBUSTIBLES.
- Díaz, A. 2015. "Sistemas de energías renovables" (1ª ed.). Pág. 163 - 224.
- Estrada, C. A., & Meneses, A. Z. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 2(25). <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229>

- Gabriel Pena, Germán Navarrete, Pedro Curto. A. 2019. "Potencial energético de rastrojos cerealeros". Pág. 5. [https://www.fing.edu.uy/imfia/congresos/caae/assets/trabajos/new/Trabajos-Poster/85\\_Potencial\\_energético\\_de\\_rastrojos\\_cerealeros.pdf](https://www.fing.edu.uy/imfia/congresos/caae/assets/trabajos/new/Trabajos-Poster/85_Potencial_energético_de_rastrojos_cerealeros.pdf)
- Global Energy. (2020). Nopal (cactus) biocombustible excepcional.
- González, A. 2009. "Energías renovables". Pág. 217 - 285.
- Hidalgo, A. 2019. "Producción de biometano". [https://cyted.org/sites/default/files/produccion\\_de\\_biometano\\_cartif.pdf](https://cyted.org/sites/default/files/produccion_de_biometano_cartif.pdf)
- Ierra, C. A. S., Barrios, R. L. A. (2013). Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. Ingenium Revista de la facultad de ingeniería, 14(28), 6-15.
- John Deere, N. (2019). "El nopal como biocombustible". Lamsa
- Martí, A. 2008. "Biodigestores familiares: Guía y diseño manual de instalación".
- Ramírez Arpide, F. R. (2017). Análisis del ciclo de vida y factibilidad económica de la producción de bioenergía a partir de nopal. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/50>
- Rillo, C., Tocado, L., Reineman, R. C., Warburton, R. J. (2017). Sistema y método de licuefacción de gas.
- Varnero, A. 2011. "Manual de biogás". Pág. 53 - 62.
- De Kuyper, J. C. V. (2014). Fuentes de energía renovables y no renovables. Aplicaciones. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (77), 216-218.