

# Generación de biogás por digestión anaerobia a partir de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y nejayote

## Biogas generation by anaerobic digestion from prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) and nejayote

Villapudua Rivera L.F.<sup>1</sup>, Sandoval Rojas I.<sup>2</sup>, Chávez Parga M.C.<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas Calle Josefa Ortiz de Domínguez esq. Ave. de Las Américas, Ciudad Universitaria, Culiacán Rosales, Sinaloa, <sup>2</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química. Francisco J. Mujica SN, Edificio V1 – CU. Morelia, Michoacán.

### RESUMEN

En México, la comercialización del nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) y la producción de tortillas generan residuos agrícolas y subproductos como resultado de su amplio consumo. Los restos de la cosecha del nopal, y el nejayote un subproducto del proceso de elaboración de tortillas, representan una oportunidad para ser empleados como sustratos en la digestión anaerobia (DA) para la generación de biogás. Este estudio se enfoca en analizar el porcentaje y gasto energético del biogás obtenido mediante esta práctica sostenible y su impacto en la gestión de residuos y producción de energía renovable. Se utilizó un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) a escala piloto para llevar a cabo la DA. Este mismo fue alimentado semanalmente con residuos pretratados de penca de nopal y nejayote. Durante el estudio, se monitorearon diversos parámetros fisicoquímicos para evaluar el desempeño del proceso, pH, conductividad, alcalinidad, relación alfa, sólidos totales y sólidos totales volátiles. Mediante un cromatógrafo de gases BUCK Scientific®, se determinó que el biogás generado contiene un 62% de metano (CH<sub>4</sub>), y un 38% de CO<sub>2</sub>; con un rendimiento de 195 NmL/gSV y 300 NmL/gSV, al ser el proceso de adaptación se puede ver como una fuente de energía renovable, destacando su potencial como fuente de energía renovable. Sin embargo, el análisis del gasto energético necesario para el mantenimiento y alimentación del reactor, comparado con la energía neta generada por el biogás, indicó que la producción de biogás a base de nopal y nejayote es un proceso sostenible. Semanalmente, se produjeron 0.0581 kW – 0.06279 kW de energía y se emplearon 16.652 kW. Es relevante considerar que el reactor estaba en una etapa de adaptación, en la cual tanto la escala del reactor, la frecuencia de alimentación y la variabilidad de las magnitudes monitoreadas pueden influir en la cantidad del biogás producido.

**Palabras clave:** Digestión anaerobia, Biogás, Nopal, Nejayote.

### ABSTRACT

In Mexico, the marketing of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) and the production of tortillas generate agricultural waste and by-products as a result of their widespread consumption. The residues from the prickly pear harvest and nejayote, a by-product of the tortilla-making process, present an opportunity to be utilized as substrates in anaerobic digestion (AD) for biogas generation. This study focuses on analyzing the percentage and energy expenditure of the biogas obtained through this sustainable practice and its impact on waste management and renewable energy production. A pilot-scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor was used to perform AD. It was fed weekly with pre-treated waste from prickly pear pads and nejayote. Various physicochemical parameters were monitored during the study to assess process performance, including pH, conductivity, alkalinity, alpha ratio, total solids, and volatile solids. Using a BUCK Scientific® gas chromatograph, it was determined that the generated biogas contains 62% methane (CH<sub>4</sub>) and 38% CO<sub>2</sub>, with a yield of 195 NmL/gVS and 300 NmL/gVS. As the adaptation process progressed, it became evident as a source of renewable energy, highlighting its potential in the renewable energy sector. However, the analysis of the energy expenditure required for reactor maintenance and feeding, compared to the net energy generated by biogas, indicated that prickly pear and nejayote-based biogas production is a sustainable process. Weekly, 0.0581 kW to 0.06279 kW of energy was produced, utilizing 16.652 kW. It is relevant to consider that the reactor was in

\*Autor de correspondencia: María del Carmen Chávez Parga

E-mail: [cparga@umich.mx](mailto:cparga@umich.mx)

ORCID ID: [0000-0001-7500-7571](https://orcid.org/0000-0001-7500-7571)

Registro ORCID Autores: ISR: [0000-0002-4887-049X](https://orcid.org/0000-0002-4887-049X), LVR: [0009-0002-2962-2615](https://orcid.org/0009-0002-2962-2615)

an adaptation stage, during which the reactor scale, feeding frequency, and the variability of monitored parameters can influence the quantity of biogas produced.

**Palabras clave:** Anaerobic Digestion, Biogas, Prickly Pear (*nopal*), Nejayote

## INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de soluciones sostenibles para abordar los desafíos ambientales y energéticos, la generación de biogás mediante la digestión anaerobia funge como una prometedora alternativa para la producción de energía renovable y la gestión adecuada de residuos orgánicos. En México, tradicionalmente se suele consumir productos como nopal (*Opuntia ficus-indica*) y tortillas, mismos que durante su producción generan residuos. En el caso de las tortillas se forma el nejayote durante el proceso de cocción del maíz y la cal, lo que lo hace un residuo bastante alcalino. Los desechos del nopal y el nejayote poseen un potencial significativo para la generación de biogás, gracias a su alto contenido de materia orgánica. El nopal destaca, principalmente, por su presencia de carbohidratos (12-17%) (Cota-Sánchez, 2018), mientras que el nejayote por su composición de carbohidratos (37.8-55.7%) y proteínas (4.9-7.4%) (Díaz-Montes y Castro-Muñoz, 2021).

En la actualidad, no existen estudios que determinen el rendimiento de la generación de biogás mediante una codigestión entre nopal y nejayote; sin embargo, en la Tabla 1 se presentan algunos trabajos donde se lleva a cabo este proceso usando nopal y nejayote por separado.

Como se puede observar, los estudios que usan nopal como sustrato presentan un rendimiento similar entre ellos y menor en comparación con los que utilizan nejayote. A pesar de esto, se pretende emplear el residuo de nopal como sustrato en la codigestión, con el objetivo de proporcionar una visión más amplia y una opción adicional para el aprovechamiento adecuado de residuos orgánicos.

Otro punto importante a tomar es el pre tratamiento que recibe la alimentación, en el caso del nopal, es recomendable añadir un alcalinizante debido a que la acidez del nopal en conjunto con la formación de ácidos orgánicos en la acidogénesis puede afectar negativamente el rendimiento del biogás (Parra-Orobio *et al.*, 2014). Al momento de hacer una co-digestión entre nopal y nejayote, la alcalinidad de este último es favorable para reducir la necesidad de controlar el pH mediante un alcalinizante.

Igualmente, controlar la temperatura es vital para los microorganismos presentes en todas las fases de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), pues se ha

comprobado que las temperaturas de condiciones mesófilicas (30-40 °C) tienen un mejor desempeño que las temperaturas de condiciones termófilicas (50-60 °C) (Yin *et al.*, 2018).

El propósito de este estudio fue determinar la concentración de metano en el biogás durante el proceso de adaptación en un reactor RAFA, alimentado con residuos de nopal y nejayote. Además, se evaluó la sostenibilidad energética de este proceso considerando la energía requerida para el mantenimiento y la alimentación del reactor en comparación con la energía obtenida a través del biogás.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio para la generación de biogás a partir de la codigestión del residuo del nopal y el nejayote fue realizado en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental, en un reactor RAFA (Figura 1) escala piloto con dimensiones de 39 cm de altura y un diámetro interno de 25.5 cm durante 25 días. La temperatura del reactor RAFA fue monitoreada con un termopar y estabilizada con un par de resistencias programadas para detenerse una vez que el termopar indicó 35.0 °C. Los análisis fisicoquímicos realizados fueron: pH, alcalinidad, conductividad, relación alfa ( $\alpha$ ), sólidos totales y sólidos volátiles. La determinación de sólidos totales y sólidos volátiles fueron realizadas según la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Para la alcalinidad, se basó en la norma mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Se realizaron las mediciones de pH y conductividad utilizando un equipo multiparamétrico de la marca Thermo Scientific® modelo Orion STAR A329 portable pH/conductivity meter, siguiendo las normas NMX-AA-008-SCFI-2016 y NMX-AA-093-SCFI-2000, respectivamente. En la Tabla 2 se presenta la distribución de los análisis fisicoquímicos realizados con respecto al día y la muestra pertinente.

Para el cálculo de la relación  $\alpha$  del inóculo se tomó como señal analítica el volumen de  $H_2SO_4$  0.02 N usado para llegar a un pH de 5.75 y como señal de fondo el volumen de ácido usado para llegar a un pH de 4.3 (Jenkins *et al.*, 1983).

Para la alimentación (realizada una vez por semana) del reactor se realizó el siguiente procedimiento:

1. Pesar y preparar 750 g de nopal, este pasa por un proceso de trituración y molienda con el fin de facilitar la hidrólisis.
2. Se mezclan 3.5 L de agua caliente para nuevamente triturarlo y filtrar la fibra, la mezcla resultante se homogeniza con 1 L de nejayote y un alcalinizante, en este caso, 5 g de CaO.
3. Una vez filtrada toda la fibra, la mezcla homogénea es alimentada al reactor.

La determinación del porcentaje de metano en el biogás se realizó en un cromatógrafo de gases BUCK Scientific®, con detector de ionización de flama (FID) y conductividad térmica (TCD) y columna empacada con sílica gel en tubo de acero inoxidable de 1 m de longitud y 1/8 " de diámetro. Las condiciones de operación fueron la temperatura del horno de 100 °C a 200 °C, del detector FID 150 °C - 200 °C y del TCD 100 °C - 130 °C.



Figura 1. Reactor RAFA escala piloto usado para la generación de biogás

En la Figura 2 se muestra el sistema conectado al flujo de salida de biogás que permite desplazar por presión un volumen de agua proporcional al volumen de biogás producido, este se puede conocer debido a que el segundo bidón cuenta con una graduación que indica las líneas de nivel. Las muestras de efluente e inóculo son recolectadas en su respectiva línea de salida. Para el gasto de energía se utilizó un medidor de consumo eléctrico (Wattímetro) Steren®.

## RESULTADOS

Con respecto a los análisis fisicoquímicos, en la Tabla 3 se muestran los resultados promedio y desviación estándar de la muestra respectiva: en el caso de la relación alfa (solamente realizada para el inóculo) se obtuvo un valor promedio de 0.64.

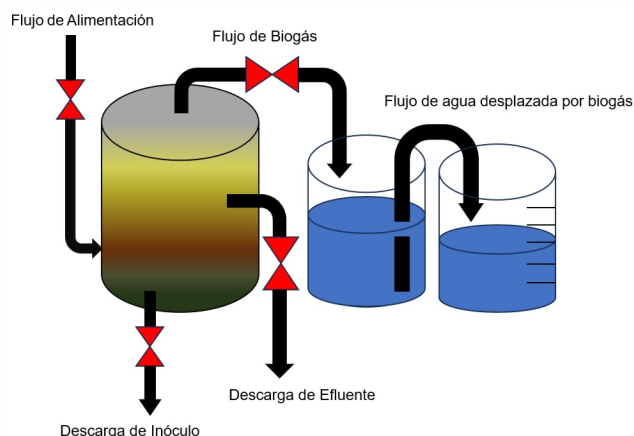


Figura 2. Esquema del reactor RAFA a escala piloto, en este se muestran los ductos por donde fluye biogás, efluente, inóculo, alimentación y agua desplazada por el biogás producido.

El seguimiento del comportamiento de los parámetros: pH, conductividad y alcalinidad se presenta en las Figuras 3. Durante los primeros seis días, se observó una pequeña disparidad entre el pH del inóculo y el del efluente. Sin embargo, a partir del séptimo día, se evidenció un contraste más pronunciado, presumiblemente atribuible al impacto de la alimentación en el sistema y la adaptación del inóculo. Este fenómeno se atribuye a la presencia de un pH básico, que ejerce influencia principalmente en el efluente, como se ilustra en la Figura 3a. En la última alimentación se tuvo un valor de pH de 7.3, se puede apreciar que no hubo alguna afección en la producción de biogás.

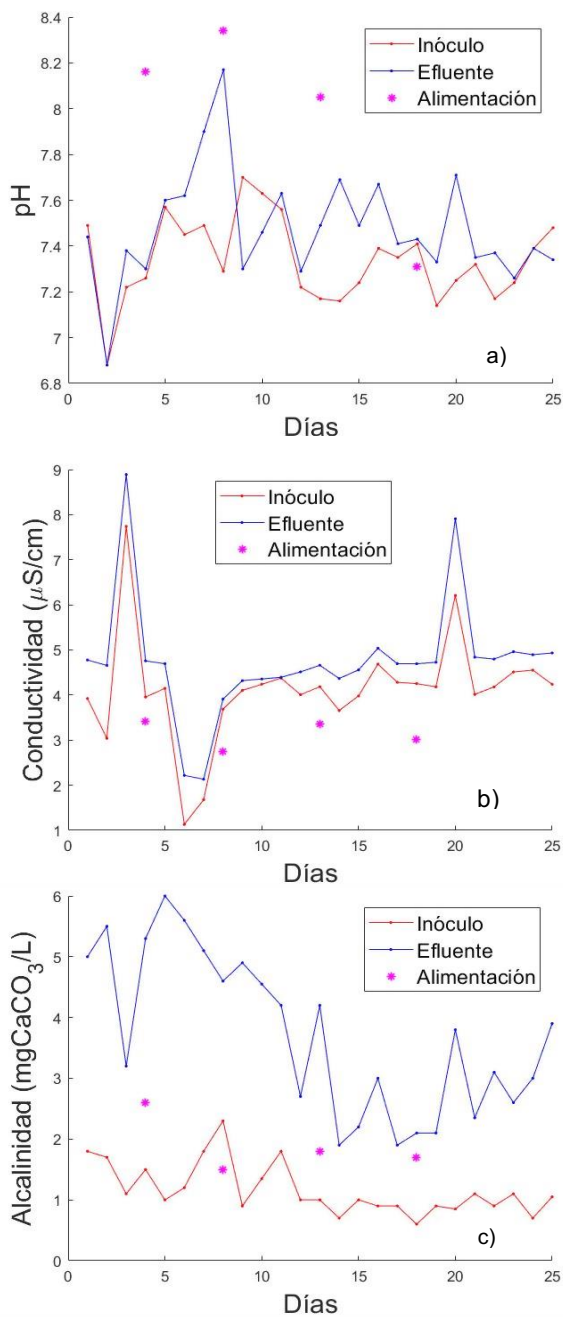


Figura 3. a) Comportamiento de pH, b) Comportamiento de conductividad, c) Comportamiento de alcalinidad.

Con respecto a la conductividad del sistema, en la Figura 3b, se muestra una tendencia similar entre el inóculo y efluente, así mismo, se pueden observar algunos puntos donde ambas conductividades son altas o bajas

con respecto al promedio, esto probablemente se deba a que la muestra no se encontraba suficientemente homogenizada, lo cual

podría considerarse debido a la escala del reactor. La conductividad de la alimentación fue ligeramente menor que la del efluente e inóculo con el fin de no aumentar la concentración de minerales, y, por ende, la conductividad.

La alcalinidad del inóculo tuvo una menor variación en su comportamiento comparada con la del efluente a pesar de mantener la alimentación relativamente constante. Aun así, la alcalinidad del efluente siempre fue superior a la del inóculo (Figura 3c).

El gasto energético semanal incluyó la energía necesaria para mantener la temperatura del reactor y la energía para llevar a cabo los procesos de pretratamiento de la alimentación (molienda, trituración y calentamiento) fue de 16.652 kWh, y la energía neta capaz de producir el biogás obtenido durante una misma semana fue de 0.0581 kWh – 0.06279 kWh, según los poderes caloríficos consultados (Balance Nacional de Energía, 2021; Hosseini & Wahid, 2014).

La producción de biogás por día fue de 1.5 NmL, y mediante cromatografía de gases se encontró que el biogás generado contiene 62% de  $\text{CH}_4$  y un 38% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y con un rendimiento de 195 NmL/gSV y 300 NmL/gSV, al ser el proceso de adaptación se puede ver como una fuente de energía renovable.

## DISCUSIÓN

La eficiencia energética está fuertemente influenciada por la frecuencia de alimentación, que en este caso fue de una vez por semana. Además, el control de las variables analizadas no solamente podría aumentar la producción de biogás, sino también mejorar su contenido de metano ( $\text{CH}_4$ ). Asimismo, una gestión adecuada de los residuos orgánicos, que reduzca su acumulación en vertederos, puede significativamente disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez contribuye a la mitigación del cambio climático.

Con respecto a otras investigaciones, se puede confirmar que aunque se obtiene un rendimiento de (62%), este fue inferior en comparación con otros estudios en los que se lleva a cabo la obtención de biogás por digestión anaerobia usando por separado nopal, obteniendo un rendimiento de 65% (Quintanar-Orozco et al. 2018; Espinosa-Garza et al., 2018) y nejayote, reportan un rendimiento de 84% (España-Gamboa et al., 2018) y 90% (Ferreira-Rolón et al., 2014). No obstante, las principales

Tabla 1. Trabajos preliminares usando como base nopal o nejayote

Autor	Pretratamiento/Codigestión	Sistema	Sustrato	Porcentaje de CH <sub>4</sub> (%)
España-Gamboa, E., et al., 2018	-	APCR (Anaerobic-Packed Column Reactor) UASB (Up-flow anaerobic sludge blanket)	Nejayote	84%
Quintanar-Orozco, et al. 2018	Pretratamiento: adición de 0.45 g de Ca(OH) <sub>2</sub> 1M	Semicontinuo	Nopal (Opuntia heliabravoana Scheinvar)	65%
Espinosa-Garza, et al., 2018	-	Semicontinuo	Nopal (Opuntia ficus-indica)	65%
Ferreira-Rolón, et al., 2014	Pretratamiento: remoción de sólidos (~50%), remoción del calcio (~35%) y pH cercano a 8	UASB	Nejayote	90%

Tabla 2. Análisis realizados a las muestras con respecto al día. (A) Alimentación, (E) Efluente, (I) Inóculo

Día/Análisis	pH	Alcalinidad	Conductividad	Relación α	Sólidos Totales	Sólidos Totales Volátiles
Lunes	E	E	E	I	-	-
	I	I	I			
Martes	E	E	E	I	-	-
	I	I	I			
Miércoles	E	E	E	I	-	-
	I	I	I			
Jueves	A	A	A		A	A
	E	E	E	I	E	E
Viernes	I	I	I		I	I
	E	E	E	I	E	E
					A	A
					I	I

diferencias son los residuos orgánicos usados (en este caso, se hizo codigestión entre nopal y nejayote), así como, el tipo y escala del reactor y los pretratamientos a dichos residuos orgánicos.

Como se mencionó previamente, este estudio cobra relevancia en virtud de su enfoque en la gestión sostenible de residuos orgánicos y su contribución al ámbito de las energías renovables. Además, proporciona un análisis inédito al estudiar de manera conjunta dos sustratos que no habían sido previamente investigados en conjunto. La identificación de la relación entre la eficiencia y estos sustratos podría ser de gran utilidad en la planificación de sistemas futuros, asegurando un rendimiento superior.

Tabla 3. Promedio y desviación estándar de análisis fisicoquímico.

Análisis / Muestra	Alimentación	Efluente	Inóculo
pH	7.96 ± 0.45	7.47 ± 0.24	7.33 ± 0.18
Conductividad (mS/cm)	3.1320 ± 0.31	4.7476 ± 1.32	4.1183 ± 1.20
Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	1.9 ± 0.48	3.712 ± 1.31	1.166 ± 0.42
Sólidos Totales (mg/L)	11 700 ± 0.00	3800 ± 0.00	29 525 ± 0.00
Sólidos Totales Volátiles (mg/L)	8600 ± 0.00	1600 ± 0.00	15 975 ± 0.00

## CONCLUSIONES

La digestión anaerobia aplicada al nopal y el nejayote demuestra ser un proceso efectivo en la producción de biogás con un contenido significativo de metano (62% CH<sub>4</sub>), especialmente cuando se emplean los pretratamientos de molienda, químico y el calentamiento en la alimentación. Siendo este el primer estudio de su tipo en cuanto a la combinación de nopal (*Opuntia ficus-indica*) y nejayote en la digestión anaerobia, los resultados de este trabajo ofrecen una valiosa opción para la implementación de sistemas que busquen maximizar el rendimiento en la producción de biogás.

## AGRADECIMIENTO

El primer autor agradece al Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico (XXVIII Programa Delfín) por permitir llevar a cabo el siguiente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Balance Nacional de Energía. (2021). Subsecretaría de Planeación y Transición Energética Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- Cota-Sánchez, J. H. (2016). Nutritional Composition of Fruit Cultivars || Nutritional Composition of the Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*). *Fruit.*, 691–712. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408117-8.00028-3>
- Díaz-Montes, E. and Castro-Muñoz, R. (2021). Analyzing the phenolic enriched fractions from Nixtamalization wastewater (Nejayote) fractionated in a three-step membrane process. *Current Research in Food Science*, 5, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.11.012>
- España-Gamboa, E., Domínguez-Maldonado, J. A., Tapia-Tussell, R., Chale-Canul, J. S. and Alzate-Gaviria, L. (2018). Corn industrial wastewater (nejayote): a promising substrate in Mexico for methane production in a coupled system (APCR-UASB). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1), 712-722. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0479-z>
- Espinosa Garza, G., Hernández, I. L. and Antonyan, N. (2018). Production of nopal-based biogas. In *Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference*.
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G. and Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO<sub>2</sub>. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 517-525.
- Hosseini, S. E. and Wahid, M. A. (2014). Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 868–875. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.204>
- Jenkins, S. R., Morgan, J. M. and Sawyer, C. L. (1983). Measuring Anaerobic Sludge Digestion and Growth by a Simple Alkalimetric Titration. *Water Pollution Control Federation*, 55(5), 448–453. <http://www.jstor.org/stable/25041903>
- NMX-AA-034-SCFI. (2015). MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.

NMX-AA-036-SCFI. (2001). DETERMINACIÓN DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS. NMX-AA-036-SCFI-2001.

NMX-AA-008-SCFI. (2016). MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS.

NMX-AA-093-SCFI. (2000). DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTROLÍTICA.

Parra-Orobio, B., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., Cárdenas-Cleves, L. M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., and Ordóñez-Andrade, J. A.. (2014). INFLUENCIA DEL pH SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE BIORRESIDUOS DE ORIGEN MUNICIPAL. *Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2),553-562.

<http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2/v17n2a27.pdf>

Quintanar-Orozco, E. T., Vázquez-Rodríguez, G. A. and Beltrán-Hernández, R. I. (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28403–28412. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2845-x>

Yin, D. M., Westerholm, M., Qiao, W., Bi, S. J., Wandera, S. M., Fan, R. and Dong, R. J. (2018). An explanation of the methanogenic pathway for methane production in anaerobic digestion of nitrogen-rich materials under mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology*, 264, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.062>