

PRODUCCIÓN DE BIOMETANO (BIO-CH₄) DURANTE LA FORMACIÓN DE BIOPELÍCULAS EN OPUNTIA IMBRICATA MEDIANTE LA DEGRADACIÓN DE AGUA RESIDUAL LÁCTEA

*PRODUCTION OF BIOMETHANE (BIO-CH₄) DURING BIOFILM
FORMATION IN OPUNTIA IMBRICATA THROUGH THE
DEGRADATION OF DAIRY WASTEWATER*

MARTHA OCAÑA LÓPEZ¹

ALMA I. SORIA ORTIZ¹

EDUARDO OSORIO
HERNÁNDEZ²

ILIANA M. MORENO
DÁVILA¹

RESUMEN

Las necesidades energéticas están creciendo deliberadamente, sin embargo, las reservas de combustibles fósiles se están agotando debido a su uso excesivo, esto ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de energías renovables. Para el experimento se utilizó agua residual láctea (ARL) de una industria en Saltillo, Coahuila, como inóculo se utilizó lodo anaerobio (LA) de una cervecería de Torreón, Coahuila y como sustrato para la formación de biopelículas se utilizó el tallo seco de una cactácea (*Opuntia imbricata*). Las aguas residuales se caracterizaron conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021. La formación de la biopelícula se realizó en un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), con capacidad de 4.5 L al cual se le añadió: 350 mL de lodo anaerobio, 24 g de *O. imbricata*, 3.5 L de ARL (20.1 g/L de O₂) a pH 7.0, y para la generación de Bio-CH₄ se llevó a cabo en reactores discontinuos con un volumen de 120 mL a los cuales se les agregó 72 mL de ARL (20.1 g/L de O₂), 8 mL de lodo anaerobio y 3 piezas de *O. imbricata*, este experimento se realizó por triplicado. Los resultados mostraron una producción específica total de 11.63 mmol de Bio-CH₄ y 97.95 % de eficiencia en la remoción de materia orgánica, con una duración total de 192 h. De manera de conclusión tenemos que los resultados obtenidos en este trabajo demuestran una forma eficiente y económica de producir Bio-CH₄, y de degradar la materia orgánica, mediante el uso de las aguas residuales lácteas.

Palabras clave: biometano; biopelículas; agua residual láctea.

1. Departamento de
Biotecnología, Facultad de
Ciencias Químicas, Unidad
Sureste, UAdeC.

2. Facultad de Ingeniería y
Ciencias, Universidad
Autónoma de Tamaulipas.

Correspondencia
mayelamorenodavila@uadec.edu.mx
ORCID 0002-0008-6820-3416

ABSTRACT

*Energy needs are deliberately growing; however, fossil fuel reserves are being depleted due to their overuse, this has led to the search for new sources of renewable energy. For the experiment, milk wastewater (ARL) from an industry in Saltillo, Coahuila was used, anaerobic sludge (LA) from a brewery in Torreón, Coahuila was used as an inoculum, and the dry stem of a cactus (*Opuntia imbricata*) was used as a substrate for the formation of biofilms. Wastewater was characterized in accordance with NOM-001-SEMARNAT-2021. The formation of the biofilm was carried out in an anaerobic upflow reactor (UASB), with a capacity of 4.5 L, to which were added: 350 mL of anaerobic sludge, 24 g of *O. imbricata*, 3.5 L of ARL (20.1 g/L of O₂) at pH 7.0, and for the generation of Bio-CH₄ it was carried out in batch reactors with a volume of 120 mL to which 72 mL of ARL (20.1 g/L of O₂), 8 mL of anaerobic sludge and 3 pieces of *O. imbricata*, this experiment was performed in triplicate. The results showed a total specific production of 11.63 mmol of Bio-CH₄ and 97.95 % efficiency in the removal of organic matter, with a total duration of 192 h. In conclusion, we have that the results obtained in this work demonstrate an efficient and economical way to produce Bio-CH₄, and to degrade organic matter, using dairy wastewater.*

Keywords: biomethane; biofilms; dairy wastewater.

INTRODUCCIÓN

En México debido al crecimiento exponencial de la población se ve reflejado el incremento en el uso de combustibles fósiles y el consumo de productos industriales que satisfacen las necesidades del ser humano, sin embargo, a mayor consumo, mayor la contaminación y la dependencia de recursos no renovables, lo que genera conflictos económicos, desequilibrios sociales: la generación de la era de la ebullición global y el agotamiento del recurso (Ritchie y Roser, 2020).

La creciente demanda de los combustibles fósiles como fuente principal de energía ha provocado un alto grado de contaminación, lo

cual ha llevado a los gobiernos y a la comunidad científica a buscar nuevas fuentes de energías limpias, capaces de producir energía para reemplazar a los combustibles fósiles (García, 2022); ya que su uso reduce la dependencia de éstos, sin pasar por alto que la contaminación generada es menor, por lo cual se están implementando nuevas estrategias para la obtención de biocombustibles, particularmente biometano, mediante el uso de desechos industriales (agua residual láctea). Al utilizar un residuo para la generación de un bien, se contribuye con el medio ambiente, al disminuir la contaminación y generar energía limpia.

Las industrias lácteas generan cantidades grandes de residuos, en general producen vertidos que van de 2.5 a 5 litros de aguas residuales por litro de leche producido (De la Cueva y col., 2024), las cuales contienen contaminantes, por tanto, es necesario un tratamiento previo a verterlas al medio ambiente (Hernández y col., 2022). Las aguas residuales lácteas contienen diversos contaminantes como: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sulfatos, cloruros, grasas y aceites y pH extremos (2 a 11) (Ruíz y col., 2024). Una característica singular es que el color del agua depende del proceso en el que se encuentre (gris, blanca o naranja).

De acuerdo con la literatura, hoy en día se utilizan las aguas residuales lácteas para la generación de biocombustibles (biometano) debido al alto contenido en materia orgánica que presentan, lo que conlleva a una buena producción de este recurso. En los últimos años el biometano ha ganado relevancia como bio-combustible debido a su contenido energético de 119.66 KJ/g (Sołowski, 2018). Por esta característica las principales aplicaciones del biometano son como combustible para transportes y uso particular doméstico para la generación de energía eléctrica (Noblecourt y col., 2020).

El uso de biopelículas en el proceso de producción de biocombustibles es uno de los métodos biológicos más reportados para la producción de biometano (Zahuantitla Razo, 2020), sin embargo, una limitante durante el proceso es la baja tasa de producción. Recientemente se ha logrado incrementar la producción de biometano mediante la incorporación de consorcios microbianos inmovilizados, los cuales presentan alta producción de este biocombustible (Muñoz-Estrada y col., 2021). El objetivo de esta investigación es la producción de

biometano (Bio-CH₄) durante la formación de biopelículas en *Opuntia imbricata*, mediante la degradación de agua residual láctea. Con esta investigación se está contribuyendo a la producción de combustibles limpios y a la disminución de uso de combustibles fósiles en aguas residuales de la industria láctea. De igual manera se contribuye con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y con los programas Nacionales Estratégicos (PRONACES).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 INÓCULO

Como inóculo se utilizaron 500 ml de un cultivo mixto microbiano, proporcionados por la cervecería Modelo (Torreón, Coah.) Los lodos se caracterizaron conforme a la NMX-AA-034-SCFI-2015. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición del lodo.

Medición de sólidos	Concentración (g/L)
Sólidos totales (ST)	16.9
Sólidos totales volátiles (STV)	12.1
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	8.2
Sólidos suspendidos totales (SST)	11.9
Sólidos disueltos totales (SDT)	5.7
Sólidos disueltos volátiles (SDV)	2.4
Sólidos disueltos fijos (SDF)	3.7
Sólidos suspendidos fijos (SSF)	3.1
Sólidos totales fijos (STF)	5.1

2.2 SUSTRATO

Como sustrato se utilizó agua residual láctea proporcionada por una fábrica comercial de leche en Saltillo, Coah. Tras la recolección, las aguas residuales se trasladaron inmediatamente al laboratorio y se almacenaron a 4°C. Estas fueron caracterizadas conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de las aguas residuales lácteas.

Parámetros	Contenido
------------	-----------

Sulfatos (mL/L)	232.22 ± 0.223
Cloruros (mg/L)	308.31 ± 0.253
TDS (ppm)	158 ± 0.172
DQO (O ₂ /l)	19.9 ± 0.241
Temperatura (°C)	29 ± 0.125
Grasas y aceites (g/l)	7.3 ± 0.173
pH	8.5 ± 0.137

2.3 PREPARACIÓN DE LA BIOPELÍCULA *OPUNTIA IMBRICATA*

Para la formación de la biopelícula se utilizó el tallo seco de un cactus (*Opuntia imbricata*), cortado en piezas rectangulares (1,4 x 0,6 x 0,5 cm), previamente enjuagados y lavados con agua destilada. Las descripciones del cactus se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de la biopelícula (*Opuntia imbricata*).

Parámetros	Especificación
Identificación	<i>Opuntia imbricata</i>
Origen	Natural
Densidad	0.761 (g/cm ³)
Dimensión	1.3 x 0.7 (cm)
Área superficial	0.459 (m ² /g)
Peso seco	12 ± 0.021 (g)
Configuración	Packed bed

La generación de la biopelícula se llevó a cabo en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), el cual tiene las siguientes características: 4.5 L de capacidad, 62 cm de altura y 36 cm de diámetro. Se adicionaron 3.5 L del medio mineral (Composición en gramos por litro: 1.67 NH₄Cl, 0.83 KH₂PO₄, 0.83 K₂HPO₄, 1 MgCl₂, 0.083 FeCl₂, 0.053 NiSO₄, 0.083 CoCl₂, 0.038 ZnCl₂, 0.035 CuCl₂, 0.017 CaCl₂ y 0.050 MnCl₂ (Valdez-Vázquez y col., 2016), 24 g (peso seco) de *Opuntia imbricata* y 350 mL de cultivo microbiano anaerobio mixto, en las siguientes condiciones iniciales: 20,1 g/L O₂, 25 ± 2 °C, pH 7,0 y HRT 4,8 h. El biorreactor fue alimentado por una bomba peristáltica (MANOSTAT-división132 de Barnant Company, bomba varistaltic Si-mon, EE. UU.). Se realizaron tres ciclos de 240 h cada uno con un total de 720 h.

2.4 MONTAJE DE LOS REACTORES DISCONTINUOS

El experimento se llevó a cabo en reactores discontinuos de 120 mL

(botella de vidrio transparente de boca estrecha con tapón fenólico) a los que se añadieron 72 mL de sustrato (aguas residuales lácteas), con una concentración inicial de 19.9 g DQO/L, adicionando 8 mL de lodo anaerobio a un pH inicial de 7.0. Los reactores estaban sellados herméticamente con caucho de silicona y cubiertas de aluminio para evitar fugas de gas. Para el experimento se monitorearon los siguientes parámetros: producción de gas y remoción de DQO, se tomaron muestras cada 24 h y el experimento se realizó por triplicado, en un periodo de fermentación de 192 horas.

2.5 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para determinar la cantidad de producción de biometano se utilizó el cromatógrafo de gases (GC TCD) VARIAN 3400, equipada con una columna empaquetada Molecular Sieve 5^a inyectando 25 µl utilizando una jeringa de 1 mL. Las condiciones de GC TCD fueron: temperatura del inyector y de la columna 50 °C, temperatura del detector 200 °C y a presión de 8 atm, utilizando argón como gas portador con un caudal de 6 ml/min. La remoción de DQO se determinó de acuerdo con métodos estándar (APHA, 1998).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La generación de la biopelícula se realizó en un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) en el cual se establecieron las condiciones del reactor, como lo muestra la tabla 4, para que funcionara correctamente. Se estableció una corrida del experimento y se terminó una vez que ya no tenía materia orgánica y, por ende, ya no había producción de Bio-CH₄; la corrida duró 240 h, por lo tanto, se decidió realizar el experimento por triplicado: tres ciclos de 240 h cada uno, un total de 720 h que duró el proceso de fermentación, en donde ya se presentaba la formación de la biopelícula.

Tabla 4. Condiciones del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).

Parámetros	Medición
Volumen del reactor (m ³)	0.00375
Caudal (m ³ /d)	0.0302
Tiempo de retención hidráulica (TRH) (h)	4.8

Carga hidráulica volumétrica ($\text{m}^3 (\text{m}^3 \text{ d})^{-1}$)	4.992
Carga orgánica volumétrica ($\text{Kg DQO} / \text{m}^3 \text{ d}$)	9.98
Temperatura de la fermentación ($^{\circ}\text{C}$)	25 ± 3

3.1 PRODUCCIÓN DE BIO-CH₄ EN REACTORES DISCONTINUOS

La producción de biometano en reactores discontinuos duró en total 192 h. El experimento se realizó por triplicado. La Tabla 5 muestra la producción de Bio-CH₄ (mmol) y la producción específica de Bio-CH₄ (mmol/g COD_{removido}). Durante las primeras se observa un incremento de producción del Bio-CH₄, la mayor producción a las 96 h, sin embargo, con el transcurso del tiempo disminuyó la producción. Por el contrario, en la producción específica en mmol/g DQO removida la mayor producción se refleja a las 120 h, después de ese tiempo disminuye la producción.

Tabla 5. Producción de biometano en reactores discontinuos a una concentración de sustrato (19.9 g/L O₂) durante un periodo de fermentación de 192 h.

Tiempo (h)	Producción de Bio-CH ₄ (mmol)	Producción específica de Bio-CH ₄ (mmol/g DQO _{removido})
0	0	0
24	1.086	0.76791796
48	1.529	0.54058313
72	1.891	1.33713892
96	2.495	0.88211571
120	2.133	1.50825876
144	1.448	0.51194531
168	0.764	0.54022958
192	0.281	0.19869700

Estos resultados concuerdan con los reportados por Parra-Orobio., (2019) quienes trabajaron en la obtención de Bio-CH₄ utilizando aguas residuales de la industria láctea y como inóculo utilizaron lodos anaeróbicos que se recolectaron de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) a escala de laboratorio; además, generaron una biopelícula y como resultado obtuvieron una producción final de 82.1 ± 5.0 % superior a la de los procesos convencionales de metanogénesis, logrando así una forma efectiva de tratar las aguas residuales lácteas a la vez de generar energía.

Al término de la fermentación se obtuvo una producción específica

final de 11.63 mmol de CH_4 . Los resultados son similares a los alcanzados por Xiao y col. (2021), quienes trabajaron en la obtención de biometano por codigestión anaeróbica con lodos anaerobios, las pruebas se realizaron en reactores discontinuos y se obtuvo una producción de 11.83 mmol de Bio- CH_4 , sin embargo, obtuvieron un bajo porcentaje de remoción de materia orgánica al presentar solo 56.12 %. Estos resultados son consistentes con los logrados por Sillero y col. (2022), quienes estudiaron la generación de metano, utilizando lodos anae-robios como sustrato, a través de la fermentación oscura, dando como resultado una producción de 7.4 mmol de CH_4 acumulado, con 79.51 % de remoción de materia orgánica.

En la Figura 1 se muestra la producción de Bio- CH_4 en reactores discontinuos en relación con el periodo de fermentación, se observa que a medida que pasan las horas, la producción aumenta, reflejando un aumento a las 96 h, sin embargo, con el paso del tiempo, se produce una disminución en la producción de Bio- CH_4 y esto se atribuye a que hay menor cantidad de materia orgánica.

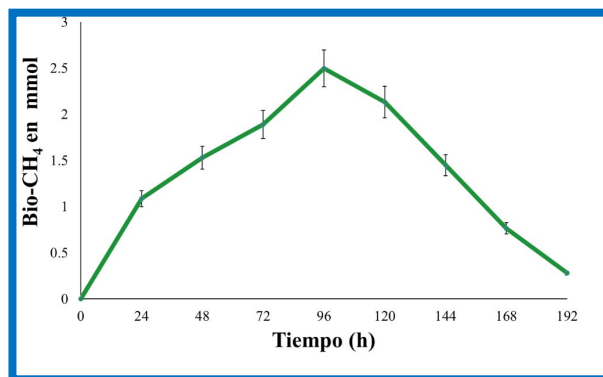


Figura 1. Producción Bio- CH_4 en reactores discontinuos en un periodo de 192 h.

Con base en los resultados obtenidos para producir Bio- CH_4 en reactores discontinuos, los datos experimentales se ajustaron con la ayuda del modelo de Gompertz, que indicó la acumulación máxima de Bio- CH_4 (H_{max}) = 107.4 mL, la velocidad de reacción máxima. (R_{max}) = 4.6 mL/d y con un $R^2 = 0.96$

Con respecto a la remoción de la DQO se puede observar que conforme pasa el tiempo se presenta una degradación constante de la materia orgánica, hasta alcanzar el máximo nivel de remoción que fue del 97.96 %, como se muestra en la tabla 6. Estos resultados coinciden con los reportados por de Siqueira y col. (2022), quienes evaluaron un

consorcio microbiano y el potencial metanogénico a través de la co-digestión de aguas residuales de la industria láctea utilizando lodos anaerobios como inóculo, el experimento se realizó en un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) a escala de laboratorio, y como resultado alcanzaron una producción total de 13.73 mmol de Bio-CH₄ g/ DQO removidos y una remoción de materia orgánica de hasta 81 %.

Tabla 6. Eficiencia de remocion de la DQO en un periodo de 192 h.

Tiempo (h)	Porcentaje de remocion DQO (%)
24	13.10
48	30.94
72	57.82
96	74.67
120	87.84
144	95.86
168	97.26
192	97.96

En la figura 2 se muestra la eficiencia de remoción de DQO y la producción de Bio-CH₄ en mmol; se puede observar que para la producción de CH₄, la mayor cifra se presenta a las 96 h y en el caso de la remoción de la DQO se observa que la remocion es constante hasta alcanzar la máxima remoción del 95.96 %.



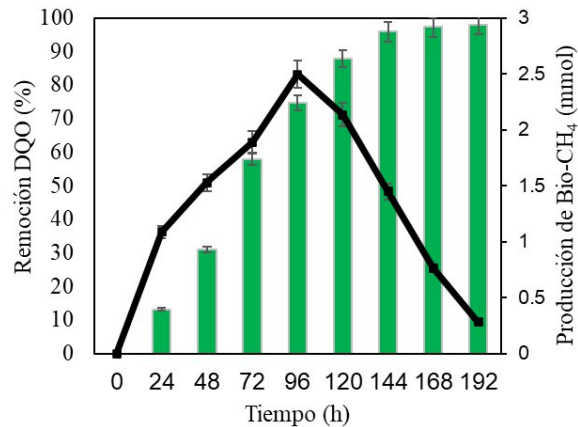


Figura 2. Producción de Bio-CH₄ y remoción de la DQO en reactores discontinuos a una concentración inicial de sustrato (19.9 g/L O₂) con un tiempo de fermentación de 192 h.

Se favoreció la producción de Bio-CH₄ y la remoción de materia orgánica en reactores discontinuos debido a que se logró mantener el pH en 6.5, este valor coincide con los encontrados por Yang y col. (2024), quienes trabajaron en la obtención de metano en reactores discontinuos a través de la digestión anaeróbica, obteniendo resultados eficientes en la producción de este biocombustible bajo esta condición.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo demostraron la factibilidad de producir Bio-CH₄ a partir de aguas residuales lácteas, mediante la formación de una biopelícula, a partir de *Opuntia imbricata*. Obteniendo resultados favorables al generar biocombustible y eliminar la materia orgánica.

Al realizar la cinética en reactores en batch, se obtuvo una producción específica de CH₄: 6.286886392 mmol/g DQO_{remov}, y una eficiencia total de remoción de la materia orgánica: 97.96 %. En un periodo de 192 h. En general, los resultados obtenidos en este trabajo demuestran una forma económica, eficiente y sostenible de producir biometano.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado a esta investigación y asimismo a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila y a la Universidad Autónoma de Tamaulipas por el apoyo proporcionado.

REFERENCIAS

APHA, AWWA, WEF (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edn, American Public Health Association, Washington, D.C., USA.

De la Cueva, F. I. C., Taipe, M. V. T., Pérez, P. L. M., & Langdon, M. M. D. (2024). La ganadería de leche y el desarrollo socioeconómico del cantón Mejía. *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 5(2): 306-330.

de Siqueira, J. C., Assemany, P., & Siniscalchi, L. A. B. (2022). Microbial dynamics and methanogenic potential of co-digestion of sugarcane vinasse and dairy secondary effluent in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Bioresource Technology*, 361: 127654. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127654

García, P. L. (2022). Uso de energías renovables vs energías fósiles en México. De: <https://www.promocionpoliticadelamujer.mx/documentos/investigaciones/uso-de-energias-renovables-vs-energias-fosiles-en-mexico.pdf> (18 de noviembre de 2024)

Hernández, C. F. A. C., Picazo, M. C., Ramos, A. E. G., & Muñoz, J. S. Z. (2022). Elasticidad de los combustibles fósiles en México/Elasticities of fossil fuels in Mexico. *Economía UNAM*, 19(57): 119-163.

Muñoz-Estrada, J. R., Velázquez-Fernández, J. B., & Aguilar-Juárez, O. (2021). Metagenómica de un biorreactor enfocado a producción de biohidrógeno en el proceso de aprovechamiento de vinazas tequileras empleando inóculo pretratado. *RINDERESU*, 5(2):798-804. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/92/96>

Noblecourt, A., Christophe, G., Larroche, C., & Fontanille, P. (2018). Hydrogen production by dark fermentation from pre-fermented depackaging food wastes. *Bioresource Technology*, 247: 864-870.

Parra-Orobio, B. A., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2019). Efecto del pretratamiento térmico de residuos de alimentos sobre la producción de metano. *Revista*

UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 22(1):1220. DOI:10.31910/rudca.v22.n1.2019.1220

Ritchie, H., & Roser, M. (2020) Global Fossil Fuel Consumption 1800-2019. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (18 de noviembre de 2024)

Ruíz, R. A., Bravo, O. G. B., Chávez, A. J. G., & Albarrán, M. R. (2024). Principales sistemas de producción de leche en México: recopilación actual de parámetros productivos, reproductivos y de manejo. *Ciencias Veterinarias y Producción Animal*, 1(2): 32-47.

Sillero, L., Solera, R., & Pérez, M. (2022). Biochemical assays of potential methane to test biogas production from dark fermentation of sewage sludge and agricultural residues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(27): 13289-13299. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.080

Sołowski, G., Konkol, I., & Cenian, A. (2020). Methane and hydrogen production from cotton waste by dark fermentation under anaerobic and micro-aerobic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 138: 124 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105576>.

Valdez-Vazquez, I., Torres-Aguirre, G. J., Molina, C., & Ruiz-Aguilar, G. M. (2016). Characterization of a lignocellulolytic consortium and methane production from untreated wheat straw: dependence on nitrogen and phosphorous content. *BioResources*, 11(2): 4237-4251. DOI: 10.15376/biores.11.2.4237-4251

Xiao, H., Fang, D., Wang, Y., Xiao, Y., Luo, L., Cheng, Z., ... & Peng, H. (2021). *Nymphoides peltatum* as a novel feedstock for biomethane production via anaerobic co-digestion with waste sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(35): 18401-18411. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.016

Yang, S., Qin, Y., Li, P., He, C., Li, P., Hou, T., ... & Jiao, Y. (2024). Optimization of Mixed Microbes Pretreatment on Corn Straw for Enhancing Methane Production. *BioResources*, 19(3): 6263. DOI: 10.15376/biores.19.3.6247-6263

Zahuantitla Razo, I. (2020). Producción de biohidrógeno a partir de vinazas vitivinícolas: potencial de componentes del sustrato y comunidad microbiana asociada. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/b93648a3-317a-4a93-81bf-b7c8f3ec6a1e/content>

