Potencial del material emergente neem (Azadirachta indica) como materia prima para una biorrefinería energética

Potential of the emerging material neem (Azadirachta indica) as a source for energetic biorefinery

David U. Santos-Ballardo[1], Karla D. Luna-Avelar[2], Miguel Betancourt-Lozano[1], Gabriela Aguilar Zárate[1], Irma E. Martínez Rodríguez[1], Dulce L. Ambriz-Pérez [3*]

[1]Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Coordinación Mazatlán, Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos.
[2]Estancias Postdoctorales SECIHTI comisionada a Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Coordinación Mazatlán.
[3]Estancias Postdoctorales SECIHTI comisionada a Facultad de Ciencias del Mar en la Universidad Autónoma de Sinaloa. Universidad Politécnica de Sinaloa, Maestría en Ciencias Aplicadas, Programa Académico de Ingeniería en Energía y Desarrollo Sostenible. *dambriz@upsin.edu.mx.

Resumen

México es un país que posee el potencial para desarrollar energías renovables, una de las alternativas de mayor interés es el uso sustentable de recursos vegetales para la producción de bioenergía y productos de alto valor, una de las opciones que se encuentra disponible pero que de manera general ha sido poco estudiada es el neem (Azadirachta indica), el cual es un árbol capaz de proliferar en zonas variadas del país,es importante destacar que a pesar de ser un producto con potencial de aprovechamiento, este ha sido subutilizado. En el presente trabajo, se realizó la extracción de aceite de semillas de neem, se caracterizó su perfil de ácidos grasos (AG) y se analizó su potencial como materia prima para biodiesel, por otro lado, se determinó el potencial metanogénico de la biomasa residual (BR); en un intento por analizar el potencial de este material como materia prima para desarrollar una biorrefinería energética. El resultado obtenido muestra un porcentaje de extracción de aceite de 28.45 ± 5.58, el perfil de AG mostró un total de 14 ácidos grasos diferentes. Los AG más abundantes observados fueron el ácido oleico, seguido de los ácidos palmítico y linolénico con 57.8, 18.4 y 14.5 % respectivamente. Por otro lado, los AG con menor concentración fueron los ácidos mirístico, behénico y cis-13,16-docosadienoico, con rangos entre 0.1-0.3 %. Del RB, se obtuvieron 33.53 ± 1.6 mililitros de metano por gramo de sólido volátil añadido. Con base en los resultados obtenidos, se concluye que las semillas de neem podrían ser una fuente de AG con potencial para producir biodiesel, mientras que la BR obtenida de este proceso muestra un potencial metanogénico adecuado, con altas posibilidades de mejora. Cabe mencionar que, con respecto a la producción de biogás a partir de la BR de neem, prácticamente no se encuentra información relevante, debido a esto, los presentes resultados pueden abrir la puerta a futuras investigaciones para el desarrollo de biorrefinerías de neem.

Palabras clave: Biodiésel, biogás, neem, biorrefinería.

Abstract

Mexico is one of the countries that possess the potential to develop renewable energies, one of the most promising alternatives is the sustainable use of vegetal resources for biofuel production and derivatives, within the multiple options of available raw material arises the neem (Azadirachta indica), which is a tree capable of growing in diverse areas of the country, and which potential as a source of high value product has not been fully exploited. In the present work, the oil extraction from neem seeds was carried out, its fatty acid profile (FA) was characterized and the potential as biodiesel feedstock was analyzed, on the other hand, the residual biomass (RB) methanogenic potential was determined; in attempt to analyze the potential of this material as feedstock to develop an energetic biorefinery. The result obtained shows an oil extraction percentage of 28.45 ± 5.58, the FA profile showed a total of 14 different fatty acids. The most abundant FAs observed were the oleic acid followed by the palmitic and linolenic acids with 57.8, 18.4 and 14.5 percent respectively. On the other hand, the FAs with the lowest concentration were myristic, behenic and cis-13,16-docosadienoic acids, with ranges between 0.1-0.3 percent. From the RB, 33.53 ± 1.6 milliliters of methane per gram of volatile solid added were obtained. Based on the results obtained, it is concluded that the neem seeds could be a source of FAs with potential to produce biodiesel, while the RB obtained from this process shows an adequate methanogenic potential, with high possibilities for improvement. It is worth mentioning that, regarding the biogas production from neem's BR, practically no relevant information is found, due to this, the present results may open the door to future research for the development of neem biorefineries.

Keywords: Biodiesel, biogas, neem, bio-refineries.

Recibido: 08/12/2025; Publicado 30/12/2025

Introducción

Los biocombustibles están cobrando cada vez más importancia en la actualidad debido a múltiples factores, destacando los efectos ambientales relacionados a los niveles de contaminación, la alta volatilidad económica de los combustibles fósiles, así como el déficit de energía disponible para satisfacer la demanda. Por ello, a nivel mundial, se ha acordado la promoción de las energías renovables, buscando mejorar la seguridad energética y la mitigación del impacto ambiental. Debido a esto, se ha impulsado económica y científicamente el desarrollo de las energías renovables.

Una opción importante son los biocombustibles, que son productos energéticos obtenidos a partir de la biomasa, incluyendo productos de origen vegetal y animal. El principio de la bioenergía (y de los biocombustibles) es aprovechar la energía contenida en los componentes químicos de la materia orgánica mediante la combustión [1].

Hoy en día, existe un gran interés global en la producción de biocombustibles como alternativa a las fuentes de energía fósiles, buscando suministrar fuentes de energía alternativa que permitan diversificar la matriz energética disponible. Por otro lado, uno de los principales objetivos del desarrollo de biocombustibles es mitigar el

impacto generado por las emisiones de gases de efecto invernadero, que se consideran estrechamente relacionados con el uso indiscriminado de combustibles fósiles y que se ha relacionado directamente con el cambio climático [2].

Debido a esto, se ha promovido el desarrollo de tecnologías energéticas sostenibles y renovables que utilizan biomasa de bajo costo; un ejemplo de ello son los materiales vegetales conocidos como emergentes, es decir, materia orgánica que normalmente no tiene uso comercial y suele desecharse o subutilizarse. Por ello, uno de los principales intereses científicos es el uso de estos productos como biomasa para la producción de biocombustibles, aprovechando su alto contenido en materia orgánica. Es importante destacar que, para lograr un equilibrio técnico-económico favorable, se ha considerado la generación de biorrefinerías [3].

Actualmente, el concepto de biorrefinerías se considera una de las estrategias clave para mejorar la viabilidad técnico/económica y energética de los biocombustibles como fuente de energía renovable. La integración de diferentes bioprocesos para la obtención de diversos productos se considera esencial para lograr un mejor rendimiento. Es importante recordar que esta estrategia no solo mejora la viabilidad económica de los procesos, sino que también permite obtener productos de alto valor a partir de materiales vegetales. Estos productos pueden incluir desde vectores energéticos como el biodiésel, el bioetanol y el biogás, hasta compuestos de alto valor como: suplementos alimenticios, colorantes, antioxidantes y otros y compuestos químicos con diversas aplicaciones [4].

Por otro lado, México se considera un país megadiverso, lo que significa que presenta una gran cantidad de hábitats diferentes; esto podría estar directamente relacionado con una amplia variedad de materias primas con potencial para producir biocombustibles de segunda generación. Entre las fuentes vegetales disponibles, el neem (*Azadirachta indica*) ha despertado interés recientemente debido a que sus semillas pueden contener un alto contenido de aceite, y todas sus partes tienen múltiples aplicaciones [5, 6].

El neem es un árbol perennifolio de tamaño mediano de la familia *Meliaceae*. Alcanza una altura de 12 a 18 m. El neem puede crecer en todo tipo de suelos, incluyendo suelos salinos, arcillosos, secos, poco profundos, alcalinos y pedregosos, e incluso en suelos altamente calcáreos. El neem crece en varios países asiáticos y en las regiones tropicales de Australia [7]. Normalmente, el neem prospera en zonas con condiciones subáridas a subhúmedas y con una precipitación anual de 400 a 1200 mm. Alcanza su máxima productividad a los 15 años de su plantación, con una vida útil de aproximadamente 150 a 200 años. La semilla de neem contiene entre un 20 % y un 30 % en peso de aceite, y sus granos contienen entre un 40 % y un 50 % de aceite. El aceite de neem contiene componentes altamente insaturados, como el ácido linoleico (6-16 %) y el ácido oleico (25-54 %), y aceites saturados como el ácido esteárico (9-24 %) [5, 6, 8].

El aceite de neem se ha utilizado tradicionalmente como combustible en lámparas en zonas rurales, y también se utiliza a escala industrial para la fabricación de jabones, cosméticos, productos farmacéuticos y otros productos no comestibles. El principal componente bioquímico del neem es el «Azardiratchi», que se utiliza con fines medicinales [7]. El aceite de neem puede utilizarse para la transesterificación tras la extracción del «Azardiratchi». Algunos autores indican que el aceite de neem tiene un alto potencial para la producción de biodiésel. Presenta un peso molecular, una viscosidad, una densidad y un punto de inflamación superiores a los del diésel [6, 8].

Sin embargo, a pesar de las posibles ventajas de utilizar este material en diferentes aspectos comerciales, no existe información científica relevante sobre el uso de los subproductos del neem. Debido a esto y a su abundancia en Sinaloa, el objetivo de este estudio fue determinar el potencial de las semillas de neem como materia prima para una biorrefinería energética.

Fundamentación Teórica

Una opción para la aplicación del concepto de biorrefinería es combinar la producción de diferentes biocombustibles, como biodiésel, biohidrógeno o bioetanol, previo a la digestión anaeróbica (DA) de la biomasa residual (para obtener biogás). Dado que, al romper las células para obtener los compuestos de interés, ya sean aceites o azúcares, se puede mejorar la producción de metano (CH_2) al aumentar la disponibilidad de los demás compuestos [9].

Por otro lado, el biogás es una mezcla compuesta principalmente de (CH_2) y dióxido de carbono (CO_2), que tiene diversas aplicaciones, como combustible para vehículos, calefacción, cocina y producción de electricidad. El biogás se obtiene mediante el proceso de DA de materia orgánica [10]. La DA es un proceso bien conocido que presenta diferentes parámetros operativos los cuales requieren control de condiciones específicas, ya que afectan directamente la producción de biocombustibles [11], tales como:

- Temperatura
- Tiempo de retención hidráulica
- Composición del sustrato utilizado
- Relación C:N
- entre otros factores

Diversos autores comentan que el proceso de DA de materiales residuales presenta algunas dificultades, principalmente relacionadas con las características intrínsecas de la materia prima o sustratos, lo que generalmente genera variaciones en la etapa de hidrólisis (una etapa limitante del proceso). En este sentido, existen diversas estrategias para mejorar el rendimiento, entre ellas, las co-digestiones, basadas en la digestión conjunta de diversos materiales, lo que mejora las propiedades del sustrato; otra opción es la aplicación de pretratamientos, que consiste en la modificación fisicoquímica de los sustratos utilizados en la DA mediante procesos que pueden ser de naturaleza física, química o biológica. Esta transformación aumenta la biodisponibilidad para producir mayores rendimientos en términos de calidad del biogás. Los principales efectos que los pretratamientos producen en los sustratos son la reducción del tamaño de partícula, aumento del área de interacción del sustrato, solubilización de componentes, y una mejora general de la biodegradabilidad y la biodisponibilidad de los materiales orgánicos, obteniendo así sustratos con mayor potencial para ser utilizados por microorganismos acetogénicos y metanogénicos [12].

Metodología

A. Material vegetal

Se recolectaron muestras de neem en la ubicación con las coordenadas 23°15′53″ N 106°22′26″ O. Las semillas se limpiaron, secaron y almacenaron en refrigeración durante un período no mayor a 3 días. Antes del secado, las semillas se limpiaron manualmente. Estas se fragmentaron para homogeneizar la transferencia de calor y facilitar el secado, y se colocaron en un horno de convección previamente calentado a 70 °C durante 15 horas. Los materiales, una vez secos, se molieron para reducir el tamaño de partícula y facilitar su manejo [13].

B. Extracción de aceite de las semillas de neem

La extracción de aceite de las semillas se realizó mediante el método Soxhlet, utilizando una mezcla de metanol y cloroformo (2:1) como disolvente y manteniendo una temperatura de 75 ± 2 °C por un periodo de 6-8 horas (con alrededor de 10 ciclos de sifonado). El porcentaje de aceite extraído se obtuvo por diferencia de peso. La biomasa residual desgrasada (BR) se secó a 60 ± 2 °C durante 12 horas para eliminar el exceso de disolventes, una vez seco se almacenó (4 °C) para su uso posterior [3].

C. Análisis de ácidos grasos

Las muestras de ácidos grasos (AG) se analizaron siguiendo la metodología descrita por Santos-Ballardo et al. [3]. Los AG se analizaron mediante una técnica de inyección "splitless" mediante cromatografía de gases con un equipo (GC Agilent Technologies 7820A) equipado con una columna Agilent DB–5 MS (60 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno y 0.25 μm de espesor de fase). La temperatura del horno se programó con incrementos de 50 a 180 °C a 10 °C min^{-1} y de 180 a 320 °C a 4 °C min^{-1}. Se utilizaron temperaturas de 300 y 320 °C para el inyector y el detector, respectivamente. Los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) se identificaron comparando los tiempos de retención con los de los AG estándar (37 compuestos FAME, Supelco™ Mix C4–C24; marcadores tróficos). Los AG se cuantificaron integrando las áreas bajo los picos en las trazas de cromatografía de gases (software CHROMQUEST 4.1®), con calibraciones derivadas de los AG estándar. Los resultados se presentan como porcentaje de ácidos grasos saturados (AGS), ácidos grasos monoinsaturados (AGMI), ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) y porcentaje de cada marcador.

D. Pruebas de producción de biogás con potencial anaeróbico

Las pruebas anaeróbicas por lotes para la evaluación y medición de la producción de metano, descritas por Ferrer et al. [14], se adaptaron y utilizaron en este estudio, como se comenta aquí.

E. Caracterización del inóculo y la biomasa residual (BR) antes de la digestión anaeróbica (DA)

Para su uso en las pruebas de DA, el inóculo recolectado del digestor anaeróbico mesófilo de una planta de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Pacífico®, ubicada en Mazatlán, Sinaloa, México, y la BR de neem se caracterizaron con base en el contenido de humedad, cenizas, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV). Estos parámetros se determinaron de acuerdo con métodos estándar [15]. Antes de los experimentos, el inóculo mesófilo se mantuvo en ayunas durante 5 días en incubadoras a 37 °C, respectivamente, hasta que la producción de biogás no fue detectable para iniciar los ensayos de potencial bioquímico de metano [14].

F. Potencial metanogénico del biorreactor de neem

Los experimentos de producción de metano se llevaron a cabo por triplicado utilizando frascos de vidrio sellados (150 mL) equipados con un septo para la medición del volumen de gas. Se utilizaron blancos (que contenían solo inóculo) para monitorear la producción de biogás del inóculo a partir de la actividad endógena [14]. Los resultados de las sondas blanco se utilizaron para corregir la producción residual de metano. El biorreactor se colocó en los frascos de los reactores en una proporción 2:1 (inóculo:sustrato). Los reactores llenos se incubaron durante 22 días a 37 ± 2 °C. Los recipientes de reacción se homogeneizaron agitando los reactores una vez al día para asegurar la resuspensión completa de los sedimentos y las capas de espuma [3]. La producción acumulada de metano (CH_4) en mililitros se calculó a partir de la medición de volumen, realizada diariamente mediante el desplazamiento de una solución de NaOH (1 N) en un eudiómetro [16].

Resultados

A. Extracción de aceite de semillas de neem y perfil de ácidos grasos.

El porcentaje de aceite extraído de la biomasa de neem fue del 28.45 ± 5.58 %, lo que indica que más de una cuarta parte de la biomasa total está compuesta de aceite vegetal disponible para generar biodiésel. Este resultado fue similar a informes previos: Ragit et al. [17] reportan un 20-30 % de aceite en las semillas y un 40-50 % en los granos. Así mismo, Ali et al. [18] obtuvieron un 30-40 % de aceite mediante extracción con solventes de las semillas de neem. Las variaciones entre los diferentes informes podrían explicarse por el lugar donde se recolectó el material; algunos autores mencionan que las condiciones ambientales podrían afectar la acumulación de aceite en los materiales vegetales [8].

Por otro lado, según el perfil de AG obtenido de los lípidos de neem (Tabla 1), se observaron 14 AG diferentes. Los más abundantes fueron el ácido oleico (C18:1, cis-9), el ácido palmítico (C16:0) y el ácido linolénico (C18:3, cis-9,12,15), que representaron rangos de 57.8 ± 0.9, 18.4 ± 1.3 y 14.5 ± 1.5 %, respectivamente. El resto de los AG representó casi el 9.3 % del total. Los AG menos abundantes observados fueron el ácido mirístico (C14:0), el ácido behénico (C22:0) y el ácido docosanienoico (C22:2, cis-13,16).

Estos resultados son similares a los de informes previos donde se ha caracterizado el aceite de neem, mostrando algunos componentes con alto contenido insaturado, como el ácido linoleico (6-16 %) y el ácido oleico (25-54 %), y aceites saturados como el ácido esteárico (9-24 %) [18, 19].

Aunque la literatura indica una variabilidad considerable, existe un consenso creciente sobre los perfiles de ácidos grasos (AG) de los aceites vegetales utilizados para producir ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). Se observan claras diferencias en la longitud de la cadena carbonada y el grado de insaturación entre las distintas materias primas. Estas diferencias influyen en las propiedades y el rendimiento del biodiésel. Los perfiles compositivos de los aceites vegetales comunes están dominados por cinco especies de ácidos grasos: palmítico (16:0), esteárico (18:0), oleico (18:1), linoleico (18:2) y linolénico (18:3), lo que coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo [20].

Tabla 1. *Perfil del contenido de ácidos grasos de semilla de neem (%).*

Ácido graso		%
Mirístico	C14:0	0.1±<0.01
Palmítico	C16:0	18.4±1.3
Esteárico	C18:0	0.2±<0.01
Oleico	C18:1, cis-9	57.8±0.9
Linoleico	C18:2, cis-9,12	4.8±0.7
Linolénico	C18:3, cis-9,12,15	14.5±1.5
y-Linoleico	C18:3, cis-6,9,12	0.5±<0.01
Araquídico	C20:0	1.8±0.1
Eicosapentanoico	C20:5, cis-5,8,11,14,17	0.3±<0.01
Behénico	C22:0	0.1±0.1
Erúcico	C22:1, cis-13	0.2±<0.01
Docosadienoico	C22:2, cis-13,16	0.1±<0.01
Docosahexaenoico	C22:6, cis-4,7,10,13,16,19	1.2±0.3
Lignocérico	C24:0	0.2±0.2
	AGS	20.8
	AGMI	58.0
	AGPI	21.4

Los datos son el promedio ± desviación estándar, n=3. AGS: Ácidos Grasos Saturados; AGMI: Ácidos Grasos Monoinsaturados; AGPI: Ácidos Grasos Poliinsaturados.

Las propiedades físicas y químicas del biodiésel están determinadas por su composición química. Debido a su considerable contenido de oxígeno, el biodiésel presenta un menor contenido de carbono e hidrógeno en comparación con el diésel de petróleo. Esto se traduce en una reducción del contenido energético másico de aproximadamente un 10 %, pero una reducción de la energía volumétrica de tan solo un 5-7 %. Dos propiedades que influyen considerablemente en el comportamiento general y la idoneidad del biodiésel son: (1) la distribución del tamaño de las cadenas de ácidos grasos (AG) y (2) el grado de insaturación dentro de estas cadenas.

Las variaciones en el biodiésel producido a partir de diferentes materias primas se explican en gran medida por estas dos propiedades [7, 8].

Por ejemplo, un grado promedio de insaturación se correlacionó altamente con problemas en varias propiedades del biodiésel, como la viscosidad, la gravedad específica, los parámetros de rendimiento a baja temperatura, el índice de cetano y el índice de yodo. Por otro lado, un aumento en la insaturación promedio conlleva un índice de cetano más bajo y una menor estabilidad a la oxidación, pero mejora el rendimiento a baja temperatura [20].

Debido a la inconsistencia de los efectos de la composición de los AG sobre las diferentes propiedades del biodiésel, no es posible definir una composición única que sea óptima con respecto a todas las características importantes. Sin embargo, algunos autores proponen estrategias con respecto a dos propiedades críticas del biodiésel: (1) rendimiento a bajas temperaturas y (2) estabilidad oxidativa.

Para un buen rendimiento a bajas temperaturas, el biodiésel debe tener bajas concentraciones de AGS de cadena larga; mientras que, para una buena estabilidad oxidativa, el biodiésel debe tener altas concentraciones de AGS y AGMI, pero bajas concentraciones de AGPI [20]. Es importante destacar que los ácidos grasos obtenidos del neem presentan características interesantes, destacando un porcentaje relativamente bajo de AGS (20.8 %), lo que generaría un biodiesel con buen desempeño en frío; además, con la suma total de AGS y AGMI que alcanza 78.8 % (donde destaca un AGMI como el oleico con 57.8 %) se generaría un producto con una buena estabilidad oxidativa; por lo que, con base en los resultados obtenidos del perfil de AG del aceite de neem, este podría ser materia prima adecuada para la producción de biodiésel de buena calidad.

B. Caracterización del inóculo y de la BR de neem

Los resultados de la caracterización del inóculo se resumen en la Tabla 2. Se observa una alta humedad, mientras que el contenido de ST del inóculo fue de 0.75 ± 0.12 %. El porcentaje de SV alcanzó el 40.49 ± 2.13 %. En general, el inóculo presentó un contenido orgánico relativamente alto, típico de materiales frescos no estabilizados [14].

La BR de neem mostró altos valores de ST y SV. Cabe destacar que los SV representa la materia orgánica, un parámetro importante en el proceso de DA, ya que este valor está directamente relacionado con la cantidad de materia que se puede utilizar en el proceso para producir biogás [11].

Tabla 2. *Caracterización del inóculo y la biomasa residual (BR) de neem. Los datos son el promedio ± desviación estándar, n=3.*

Propiedad	Inóculo	BR de neem
Humedad	99.24 ± 0.12	7.16 ± 0.12
Sólidos totales (ST)	0.75 ± 0.12	92.84 ± 0.10
Sólidos volátiles (SV)	40.49 ± 2.13	89.51 ± 1.25
Cenizas	59.50 ± 2.13	10.48± 1.22

C. Rendimiento de metano en experimentos por lotes a partir de BR de neem

El rendimiento acumulado de metano de la BR de neem, con inóculo mesófilo, se evaluó mediante pruebas anaeróbicas por lotes por triplicado. La figura 1 muestra la evolución de la producción neta acumulada durante 22 días de digestión anaeróbica. El rendimiento de metano obtenido fue de 33.53 ± 1.6 $mLCH_4\ gVS^{-1}$.

Es importante indicar que los rendimiento de metano en este estudio fueron inferiores a los de otros materiales vegetales tradicionales, como residuos alimentarios, residuos agroindustriales e incluso microalgas.

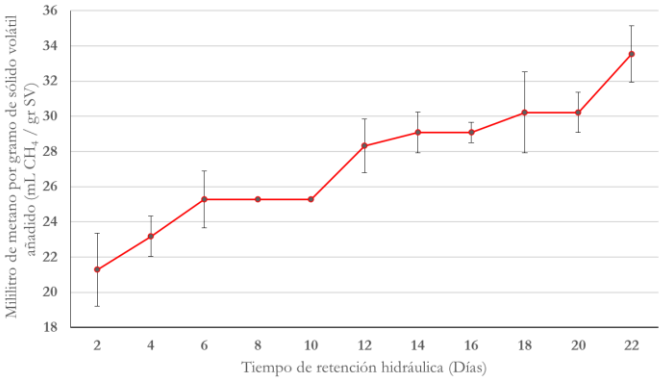

Figura 1. *Producción acumulada promedio de metano durante la digestión anaeróbica por lotes de BR de neem.*

A pesar de ello, la biomasa residual de neem representa una materia prima con buen potencial para obtener metano (debido a su alto contenido de materia orgánica), este material tiene una alta probabilidad de ser mejorado ya sea con pretratamientos y/o codigestiones para aumentar la productividad energética [11], [16].

Cabe mencionar que el rendimiento de metano en un proceso anaeróbico depende de diferentes parámetros, como el tipo de digestión, la temperatura, el tiempo de retención anaeróbica y las

características del inóculo-sustrato; por lo tanto, los resultados reportados en el presente trabajo pueden considerarse adecuados, con un alto potencial de mejora debido al alto contenido de materia orgánica volátil presente en la BR. Además, la eficiencia de la extracción de aceite y las condiciones operacionales también pueden ser mejoradas de manera importante para lograr un mejor proceso de DA [11, 14, 16].

Conclusiones

En el presente trabajo, se concluye que la semilla de neem presenta un potencial alto como fuente de ácidos grasos para la obtención de biodiésel, esto debido a su equilibrado perfil de AG que se traduciría en biodiesel de buena calidad, sobre todo en los parámetros de funcionamiento en frío y en estabilidad oxidativa. Por otro lado, la BR obtenida de este proceso presenta un alto potencial metanogénico (debido a sus valores de sólidos volátiles), con amplias posibilidades de mejorar el proceso de DA mediante la optimización a través de pretratamientos, sugiriendo el posible uso de procesos térmicos, biológicos o mecánicos para aumentar la disponibilidad de los compuestos complejos que se pudieran encontrar en la BR de neem; otra opción para mejorar el rendimiento metanogénico puede ser el uso de codigestiones ya que al tratarse de un material vegetal la relación C/N del neem debe ser alta, por lo que al combinarlo con compuestos ricos en nitrógeno (como residuos de microalgas o de pescado) se podría nivelar este parámetro operacional generando mejores rendimientos de metano. Cabe mencionar que, específicamente con respecto a la producción de metano a partir de BR de neem, prácticamente no existe información científica relevante, por lo que los resultados del presente trabajo podrían abrir la puerta a futuras investigaciones para el desarrollo de biorrefinerías energéticas que utilicen este material para obtener biodiesel y biogás de manera escalonada.

Agradecimientos

Se agradece al Ing. Joel Díaz Pasos por el apoyo técnico realizado en la investigación.

Referencias

[1] Úrsula. Oswald, "Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México," *Rev Mex Cienc Polit Soc*, vol. 230, no. 62, pp. 155–195, 2017, Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-19182017000200155

[2] V. Makareviciene, V. Skorupskaite, and V. Andruleviciute, "Biodiesel fuel from microalgae-promising alternative fuel for the future: a review," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 12, no. 2, pp. 119–130, 2013, doi: 10.1007/s11157-013-9312-4.

[3] David U Santos-Ballardo, Xavier Font-Segura, Antoni Sánchez Ferrer, Raquel Barrena, Sergio Rossi, and Angel Valdez-Ortiz, "Valorisation of biodiesel production wastes: Anaerobic digestion of residual Tetraselmis suecica biomass and co-digestion with glycerol," *Waste Management & Research*, vol. 33, no. 3, pp. 250–257, Mar. 2015, doi: 10.1177/0734242X15572182.

[4] L. Zhu, "The combined production of ethanol and biogas from microalgal residuals to sustain microalgal biodiesel: A theoretical evaluation," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 8, no. 1, pp. 7–15, Jan. 2014, doi: https://doi.org/10.1002/bbb.1442.

[5] J. P. V da Silva, T. M. Serra, M. Gossmann, C. R. Wolf, M. R. Meneghetti, and S. M. P. Meneghetti, "Moringa oleifera oil: Studies of characterization and biodiesel production," *Biomass Bioenergy*, vol. 34, no. 10, pp. 1527–1530, 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.002.

[6] A. Dhar, R. Kevin, and A. K. Agarwal, "Production of biodiesel from high-FFA neem oil and its performance, emission and combustion characterization in a single cylinder DICI engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 97, pp. 118–129, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.012.

[7] A. Karmakar, S. Karmakar, and S. Mukherjee, "Biodiesel production from neem towards feedstock diversification: Indian perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1050–1060, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.001.

[8] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1314–1324, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.004.

[9] B. Zhao et al., "Efficient anaerobic digestion of whole microalgae and lipid-extracted microalgae residues for methane energy production," *Bioresour Technol*, vol. 161, pp. 423–430, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.079.

[10] I. Okonko, T. Adeola, F. Enobong, O. Damilola, and A. Ogunjobi, "Utilization of food wastes for sustainable development," *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, vol. 8, Jan. 2009.

[11] D. U. Santos-Ballardo, S. Rossi, C. Reyes-Moreno, and A. Valdez-Ortiz, "Microalgae potential as a biogas source: current status, restraints and future trends," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 15, no. 2, pp. 243–264, 2016, doi: 10.1007/s11157-016-9392-z.

[12] F. A. Shah, Q. Mahmood, N. Rashid, A. Pervez, I. A. Raja, and M. M. Shah, "Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 627–642, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053.

[13] M. Tapia Santos, B. Pérez Armendáriz, J. Cavazos Arroyo, and Y. Mayett Moreno, "Obtención de aceite de semilla de mango manila (Mangifera indica L.) como una alternativa para aprovechar subproductos agroindustriales en regiones tropicales," *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. XVII, pp. 258–266, 2013, Accessed: Dec. 19, 2025. [Online]. Available: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14125584009

[14] I. Ferrer, S. Ponsá, F. Vázquez, and X. Font Segura, "Increasing biogas production by thermal (70DC) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion," *Biochem Eng J*, vol. 42, pp. 186–192, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.bej.2008.06.020.

[15] E. W. Rice, R. B. Baird, and A. D. Eaton, Physical and aggregate properties. USA: American Public Health Association, American Water Works Association, *Water Environment Federation*, 2017, pp. 66–78.

[16] A. Valdez, L. Germán Báez, N. Y. Mejias-Brizuela, D. Santos Ballardo, and K. Avelar, Efecto de pre-tratamientos sobre la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de la industria procesadora de mango. 2018.

[17] S. S. Ragit, S. K. Mohapatra, K. Kundu, and P. Gill, "Optimization of neem methyl ester from transesterification process and fuel characterization as a diesel substitute," *Biomass Bioenergy*, vol. 35, no. 3, pp. 1138–1144, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.004.

[18] Md. H. Ali, M. Mashud, Md. R. Rubel, and R. H. Ahmad, "Biodiesel from Neem Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engine," *Procedia Eng*, vol. 56, pp. 625–630, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.169.

[19] C. N. Anyanwu, C. C. Mbajiorgu, C. N. Ibeto, and P. M. Ejikeme, "Effect of reaction temperature and time on neem methyl ester yield in a batch reactor," *Energy Convers Manag*, vol. 74, pp. 81–87, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.029.

[20] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Ceniceros, and M. Natarajan, "Review of biodiesel composition, properties, and specifications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 143–169, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143.

Semblanza Autores

David Ulises Santos Ballardo, Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Investigador Titular B de CIAD Unidad Mazatlán; Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT) como Investigador Honorífico; actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación. así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.

Karla Denisse Luna Avelar, Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigadora Posdoctoral SECIHTI en CIAD, unidad Mazatlán; pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), como candidato. Ha realizado investigación en el área de los alimentos, particularmente en la generación de productos, tomando como protagonista a las microalgas e involucrando herramientas de Ingeniería Genética. Actualmente su línea de investigación está dirigida al manejo sustentable de residuos orgánicos agroindustriales y a la generación de bioenergía, mediante el acoplamiento de bioprocesos.

Miguel Betancourt Lozano**,** Doctor en Ciencias por el Instituto de Acuacultura de la Universidad de Stirling, en Escocia. Investigador Titular C y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel 3. Su investigación se centra en el desarrollo de herramientas ecotoxicológicas orientadas a relacionar la presencia, persistencia y toxicidad de contaminantes con posibles alteraciones en sistemas biológicos. Bajo una perspectiva multidisciplinaria, aborda diversos aspectos relacionados con la problemática ambiental de los ecosistemas costeros del noroeste mexicano. En este sentido su interés también recae en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante bioprocesos

Gabriela Aguilar Zárate, Ingeniera Bioquímica en Recursos Acuáticos con Maestría en Ciencias. Investigadora Asociada en el Centro de Investigación en alimentación y Desarrollo A.C. subsede Mazatlán. Autora de publicaciones científicas. Asesora de tesis de licenciatura y

maestría e impartición de cursos. Participación en el desarrollo de proyectos de Investigación en Ecotoxicología y Procesamiento de residuos para obtener productos de valor. Experiencia en Bioquímica, principalmente análisis de plaguicidas por Cromatografía de gases

Irma E. Martínez Rodríguez, Maestra en Ciencias. Investigadora Asociada en el Centro de Investigación en alimentación y Desarrollo A.C. subsede Mazatlán. Autora de publicaciones científicas. Colaboración en la como asesora de tesis de licenciatura y maestría e impartición de cursos. Participación en el desarrollo de proyectos de Investigación en Ecotoxicología y Procesamiento de residuos para obtener productos de valor. Experiencia en Química Analítica, principalmente análisis de compuestos químicos por Cromatografía de líquidos de alta resolución

Dulce L. Ambriz Pérez, Dra. en Ciencias. Realiza investigación en aprovechamiento integral de residuos, generación de valor agregado y biorremediación. Perteneciente al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII), Nivel 1; y al Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos (SSIT), nivel Investigadora honorífica. Docente en UPSIN en los programas de Ing. en Energía y Desarrollo Sustentable e Ing. en Nanotecnología y miembro del núcleo básico de la Maestría en Ciencias Aplicadas de UPSIN.