

## Consortios Microalga-Bacteria: una Estrategia Sostenible para Valorizar el Dióxido de Carbono del Biogás

Francisco Javier Choix-Ley<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México. Avenida Insurgentes 1582 Sur, C.P. 03940, Ciudad de México

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua, Circuito Universitario S/N, Campus II, C.P. 31125, Chihuahua, Chih., México

\* Autor de correspondencia: [fchoix@uach.mx](mailto:fchoix@uach.mx); [fchoixle@secihti.mx](mailto:fchoixle@secihti.mx). Tel.: +52 (614) 2366004

### Artículo de divulgación científica

Recibido: 18 de agosto de 2026    Aceptado: 28 de septiembre de 2026    Publicado: 25 de octubre de 2026

DOI: <https://orcid.org/0000-0002-6971-2730>

**Resumen:** Hoy en día, el diseño de consorcios microalga-bacteria, así como el suministro de gases industriales como fuente de carbono son estrategias implementadas para maximizar la relación costo-beneficio de la producción de compuestos bioactivos – es decir, sustancias naturales beneficiosas para la sociedad – como pigmentos, polisacáridos, proteínas, vitaminas, hormonas, antioxidantes, entre otros. En nuestra aportación, el objetivo de este trabajo es divulgar el potencial del consorcio microalga-*Azospirillum* para incrementar la captura de CO<sub>2</sub> del biogás y convertirlo en compuestos bioactivos de interés comercial. La capacidad de la bacteria *Azospirillum* para adaptarse fisiológicamente a la composición estresante del biogás y mantener activos sus diversos mecanismos promotores del crecimiento, permite establecer una asociación sinérgica con diversos tipos de microalgas. Esta robustez del consorcio microalga-*Azospirillum* es lo que le permite aumentar la actividad fotosintética de las microalgas para capturar el CO<sub>2</sub>; y posteriormente transformarlo en diversos compuestos bioactivos. Esto indica que esta bacteria es un socio adecuado para las microalgas durante la captura de CO<sub>2</sub> del biogás, representando una estrategia sostenible para mejorar la capacidad de bio-refinería – vale decir, fábricas biológicas de reciclaje – de microalgas y su aplicación en múltiples sectores económicos como el cosmético, alimenticio, energético, y agrícola. Este conocimiento tiene un potencial transformador y de renovación en futuras investigaciones sobre procesos biotecnológicos basados en microalgas durante la captura de CO<sub>2</sub> de biogás; esto permitirá planificar en el futuro nuevas aplicaciones para estos organismos o incluso aumentar la eficiencia de los procesos biotecnológicos ya desarrollados.

**Palabras clave:** *Azospirillum*, bioeconomía circular, fotosíntesis, compuestos bioactivos

### Introducción

La capacidad de las microalgas para capturar CO<sub>2</sub> mediante su proceso fotosintético y transformarlo en compuestos bioactivos se reconoce como una estrategia sostenible para reducir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y disminuir los efectos del cambio climático (Arenas Colarte *et al.*, 2025). Actualmente, desde una perspectiva de bioeconomía circular – reciclar, reutilizar, reducir –, estos microorganismos son aprovechados en sectores industriales como el cosmético, farmacéutico, nutrición, ambiental, y bioenergético. De esta manera, algunos sectores logran dar valor – esto es, transformar un residuo en un recurso útil – a sus emisiones gaseosas e intentar cumplir con la normativa ambiental respecto a la gestión adecuada de dichas emisiones (Goswami *et al.*, 2024).

En este contexto, el biogás es un subproducto de la digestión anaerobia (DA) de residuos orgánicos como aguas residuales, residuos agroindustriales, vegetales, alimentarios, entre otros (Devi *et al.*, 2022). Aunque la composición del biogás depende del residuo utilizado y las condiciones operativas del proceso de DA, este efluente gaseoso está compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>:65-70%) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>:25-30%). Actualmente, el alto contenido de CH<sub>4</sub> del biogás se considera una fuente de energía alternativa debido a su poder calorífico de 20 a 25 MJ/m<sup>3</sup>; mientras que el contenido de CO<sub>2</sub> es una importante fuente de carbono para microorganismos fotosintéticos como las microalgas. Dado que el CO<sub>2</sub> del biogás reduce el poder calorífico del CH<sub>4</sub> y podría impedir su uso como fuente de energía. Al día de hoy, se emplean diversas estrategias físicas y químicas para remover el CO<sub>2</sub> del biogás, por ejemplo: adsorción por oscilación de presión; absorción mediante disolventes líquidos; tecnologías de membrana; entre otras. Pero algunos de estos métodos utilizan compuestos químicos de alta toxicidad, o bien, el CO<sub>2</sub> es liberado nuevamente al ambiente una vez saturada su capacidad. Es en este punto donde el metabolismo natural las microalgas emerge como una estrategia biotecnológica para transformar el CO<sub>2</sub> del biogás en diversos compuestos bioactivos y, simultáneamente, dar valor o un beneficio adicional al CO<sub>2</sub> de biogás. Hoy por hoy, diversos géneros o tipos de microalgas como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Chlamydomonas*, y *Spirulina* son utilizadas para capturar el CO<sub>2</sub> del biogás. Sin embargo, el desempeño de cada microalga puede variar debido a que cada microalga posee diferentes capacidades biotecnológicas; y, en segundo lugar, debido a que las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> pueden generar condiciones

de estrés afectando el proceso de fotosíntesis de las microalgas y, por ende, la tasa de captura de CO<sub>2</sub>, así como la acumulación de compuestos bioactivos (Bose *et al.*, 2019). Por esta razón, hoy en día se dedican esfuerzos para desarrollar estrategias novedosas que aumenten el potencial biotecnológico de las microalgas para capturar y valorizar el CO<sub>2</sub> del biogás.

Recientemente, el desarrollo de consorcios de microalgas con otros microorganismos – ya sea una bacteria, un hongo, u otra microalga— surge como una estrategia para maximizar la captura de CO<sub>2</sub> del biogás, ya que dichas asociaciones pueden aumentar la capacidad de las microalgas para producir compuestos naturales y su resistencia a condiciones de estrés. En este sentido, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés) del género *Azospirillum* tienen la capacidad de influir directa y positivamente en la eficiencia fotosintética de las microalgas y mejorar su tolerancia a diversas condiciones ambientales (Contreras *et al.*, 2024). Por lo tanto, considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo es difundir el potencial del consorcio microalga-*Azospirillum* para incrementar la captura de CO<sub>2</sub> del biogás y valorizarlo en compuestos bioactivos de interés comercial.

## Desarrollo

### Microalgas

Las microalgas son microorganismos acuáticos fotosintéticos que habitan en océanos, lagos, ríos, presas, incluso en charcos. En la naturaleza, las microalgas no se encuentran solas, por lo que pueden interactuar con otros organismos, como hongos, bacterias, u otras microalgas. Por lo anterior, tienen la capacidad de establecer diferentes asociaciones con cada microorganismo afectando de manera positiva o negativa sus capacidades biotecnológicas. Por ejemplo: interacciones positivas (mutualismo), negativas (parasitarias) o neutras (comensalismo) (Rosero-Chasoy *et al.*, 2021). Actualmente, el desarrollo de consorcios mutualistas de microalgas con otros microorganismos surge como una nueva frontera de investigación, ya que la complementación de sus capacidades fisiológicas aporta nuevas capacidades biotecnológicas para cada microorganismo. Por lo anterior, el desarrollo de este tipo de consorcios sinérgicos — es decir donde se incrementa el potencial de los microorganismos involucrados — son de interés económico y sostenible, ya que mejoran el rendimiento y la productividad del cultivo de microalgas. En este sentido, los consorcios de microalgas y bacterias son comúnmente utilizados en diversas actividades industriales y biotecnológicas. Sin embargo, un factor fundamental para que un consorcio microalga-bacteria desempeñe con éxito una tarea específica, es la asociación de la microalga y bacteria adecuadas, es decir, compatibles para funcionar bajo las condiciones particulares de cada proceso.

### Bacterias del género *Azospirillum*

A la fecha, las bacterias del género *Azospirillum* son las más estudiadas debido a su capacidad para mejorar el crecimiento, el desarrollo y la productividad de diversas plantas de interés agrícola como maíz, trigo, arroz, además de microalgas (Cassán *et al.*, 2020). Por tal razón, estas bacterias *Azospirillum* se utilizan ampliamente en actividades agrícolas, sistemas acuapónicos; y representan un área emergente en la investigación ambiental y ecológica que busca solucionar problemas medioambientales. Hoy por hoy, se tienen reportes de la influencia positiva de *Azospirillum* sobre diferentes tipos de microalgas durante la biorremediación de aguas residuales, producción de biocombustibles, y la restauración de suelos erosionados. Específicamente, estas bacterias mejoran las capacidades fisiológicas de las microalgas mediante múltiples mecanismos de promoción del crecimiento tales como: (1) producción de vitaminas; (2) producción de fitohormonas; (3) fijación o captura de nitrógeno; (4) producción de sideróforos; (5) liberación de materia orgánica; y (6) prevención de la presencia de bacterias perjudiciales (Palacios *et al.*, 2022). Debido a lo anterior, *Azospirillum* se perfila como un socio interesante para desarrollar consorcios microalga-bacteria y mejorar el desempeño fisiológico de las microalgas durante la fijación de CO<sub>2</sub> del biogás. Recientemente, Garciglia-Mercado *et al.* (2024, 20245 y Contreras *et al.* (2025) revelaron las adaptaciones fisiológicas que *Azospirillum brasilense* realiza en sí misma para mantener activos sus diferentes mecanismos de promoción creciendo bajo las condiciones estresantes del biogás. Esto último, resalta la capacidad de *Azospirillum* para establecer una asociación sinérgica con las microalgas bajo la composición estresante de este efluente gaseoso, indicando que esta bacteria es un socio adecuado para las microalgas durante la captura de CO<sub>2</sub> del biogás.

### Consorcio microalga-Azospirillum

El principal reto de trabajar con el desarrollo de consorcios microalga-bacteria es mantener la robustez del consorcio — es decir, su afinidad y estabilidad —; estos factores son fundamentales durante la captura de CO<sub>2</sub> del biogás. La afinidad, se refiere en la comunicación entre ambos microorganismos para complementar su metabolismo mediante el intercambio de nutrientes; mientras que la estabilidad, se refiere a mantener la interacción sinérgica o funcionalidad del consorcio bajo las condiciones específicas de cada proceso (Barbosa-Núñez *et al.*, 2023). En este sentido, bajo las condiciones de estrés que impone la composición del biogás —pH ácido y anaerobiosis—, varios estudios han demostrado que el consorcio microalga-Azospirillum se mantiene estable gracias a la producción e intercambio de metabolitos. Como se muestra en la Figura 1, principalmente la microalga produce y secreta el aminoácido triptófano y la vitamina Tiamina. Estos compuestos son utilizados por Azospirillum para producir y secretar la fitohormona ácido indolacético. Posteriormente, esta fitohormona (ácido indolacético) es consumido por las microalgas, lo que estimula que incrementen su crecimiento y su proceso fotosintético para capturar CO<sub>2</sub> (Pelayo-González *et al.*, 2026; Barbosa-Núñez *et al.*, 2022).

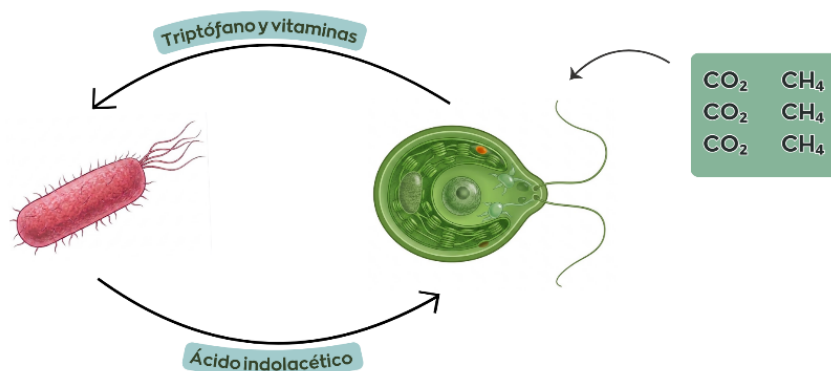


Figura 1. Producción e intercambio de compuestos celulares que sustentan la sinergia del consorcio microalga-Azospirillum durante la captura de CO<sub>2</sub> del biogás.

De igual manera, en la Figura 2, se muestra la estabilidad de la asociación de la bacteria *Azospirillum brasilense* con las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* durante la captura de CO<sub>2</sub> del biogás. Es precisamente esta estabilidad y comunicación cercana entre estos microorganismos lo que le permite a este consorcio potenciar el metabolismo de microalgas durante la fijación de CO<sub>2</sub> del biogás y la producción de compuestos bioactivos.

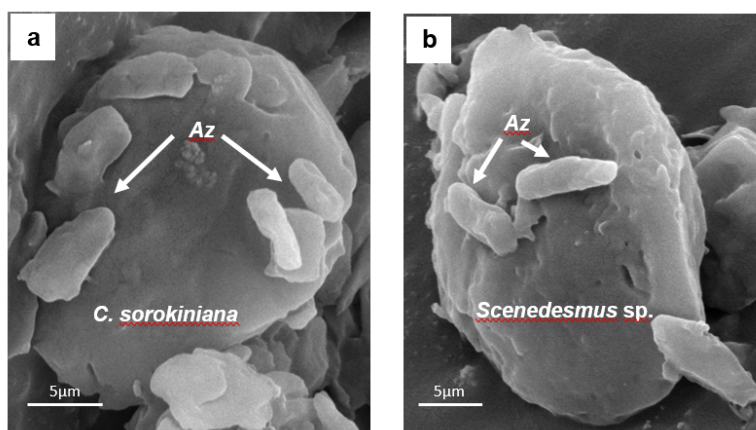


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de la asociación del consorcio de la microalga *Chlorella sorokiniana* (a) y *Scenedesmus sp.* (b) con la bacteria *Azospirillum brasilense* durante la captura de CO<sub>2</sub> a partir de biogás con una composición de 25% CO<sub>2</sub>-75% CH<sub>4</sub>.

Por ejemplo, en la Figura 3 se presentan las tasas de captura de CO<sub>2</sub> a partir de biogás que alcanzaron las microalgas *Chlorella*, *Scenedesmus*, y *Chlamydomonas* en consorcio con *Azospirillum* en comparación cuando estuvieron cultivadas

solas. La capacidad de esta bacteria para mantener activos sus mecanismos de promoción es lo que le permite aumentar el potencial de las microalgas para capturar el CO<sub>2</sub> de este efluente gaseoso; y posteriormente transformarlo en diversos compuestos bioactivos como se muestra en la Tabla 1. Estos resultados resaltan la capacidad de *Azospirillum* para establecer una asociación sinérgica con diversas microalgas bajo la composición estresante del biogás. Por consiguiente, el desarrollo biotecnológico de consorcios microalga-*Azospirillum* tienen potencial para mejorar la captura de CO<sub>2</sub> del biogás y valorizarlo en compuestos de interés comercial.

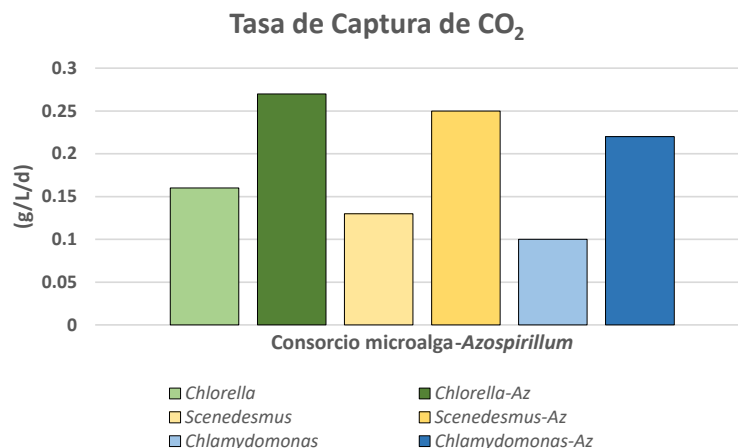


Figura 3. Tasa de captura de CO<sub>2</sub> de diferentes géneros de microalgas en consorcio con la bacteria *Azospirillum brasilense* a partir de biogás con una composición de 25% CO<sub>2</sub>-75% CH<sub>4</sub>.

**Nota:** Resultados del autor obtenidos a través del desarrollo del proyecto de ciencias de frontera CF15769.

Tabla 1. Producción de compuestos bioactivos por diferentes géneros de microalgas en consorcio con la bacteria *Azospirillum brasilense* a partir de biogás con una composición de 25% CO<sub>2</sub>-75% CH<sub>4</sub>

|                             | Compuestos bioactivos  |                        |                      |                      |                  |                |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------|
|                             | Clorofila a<br>(µg/mL) | Clorofila b<br>(µg/mL) | Carotenos<br>(µg/mL) | Carbohidratos<br>(%) | Proteínas<br>(%) | Lípidos<br>(%) |
| <i>C. sorokiniana</i>       | 144                    | 56                     | 47                   | 34                   | 39               | 29             |
| <i>C. sorokiniana</i> – Az  | 205                    | 138                    | 89                   | 55                   | 48               | 47             |
| <i>Scenedesmus</i> sp.      | 103                    | 63                     | 32                   | 36                   | 41               | 37             |
| <i>Scenedesmus</i> sp. – Az | 183                    | 90                     | 64                   | 55                   | 53               | 46             |
| <i>Chlamydomonas</i>        | 98                     | 50                     | 31                   | 25                   | 32               | 15             |
| <i>Chlamydomonas</i> – Az   | 155                    | 124                    | 48                   | 36                   | 50               | 35             |

**Nota:** Resultados del autor obtenidos a través del desarrollo del proyecto de ciencias de frontera CF15769.

### Tendencia del consorcio microalga-*Azospirillum*

Es importante mencionar que el cultivo del consorcio microalga-*Azospirillum* después de cumplir su primera función de remover el CO<sub>2</sub> y purificar CH<sub>4</sub> del biogás (incidencia en energía) presenta la factibilidad de emplearse en el sector agrícola como un biofertilizante debido a la producción de fitohormonas; o bien, suplemento en la elaboración de piensos – es decir alimentos para animales - debido a su contenido de proteínas; aunque esto último depende la normatividad regulatoria y de la inocuidad de esta estrategia biotecnológica. Lo anterior, contribuirá a la valorización de residuos industriales e incidir positivamente en la bio-economía circular de México (reciclar, reutilizar, reducir), empatando con los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU para el año 2030, referentes a “energía asequible y no contaminante” y “acción por el clima”.

### Retos y limitaciones del consorcio microalga-*Azospirillum*

En la actualidad, el uso del consorcio microalga-*Azospirillum* enfrenta algunos retos; por ejemplo: evaluar la viabilidad técnico-económica de esta estrategia biotecnológica; mantener la robustez (afinidad y estabilidad) de este consorcio

cultivado en volúmenes de producción comercial; evaluar el desempeño del consorcio con diferentes emisiones gaseosas. Mientras que las principales limitaciones se basan en la inocuidad del consorcio, así como en normatividad regulatoria del uso de estos microorganismos en aplicaciones agrícolas, bioenergía, y ambientales.

## Conclusiones

El desarrollo del consorcio microalga-*Azospirillum* aporta un nuevo enfoque para remover el CO<sub>2</sub> de efluentes industriales de manera sostenible. Lo anterior, amplía el conocimiento y aplicación de la incidencia positiva de una bacteria promotora del crecimiento de plantas, como *Azospirillum*, en aspectos ambientales y energía, no solo en aplicaciones agrícolas. Este conocimiento tiene un potencial transformador y de renovación en futuras investigaciones sobre procesos biotecnológicos basados en microalgas y PGPB durante la captura de CO<sub>2</sub> de biogás; esto permitirá planificar en el futuro nuevas aplicaciones para estos organismos o incluso aumentar la eficiencia de los procesos biotecnológicos ya desarrollados.

**Declaración de uso de IA:** Este trabajo utilizó el programa de inteligencia artificial Gemini únicamente para la elaboración de figuras y resumen gráfico.

## Bibliografía

- Arenas Colarte, C., Balic, I., Díaz, Ó., Moreno, A. A., Amenabar, M. J., Bruna Larenas, T., & Caro Fuentes, N. (2025). High-value bioactive molecules extracted from microalgae. *Microorganisms*, 13(9), 2018. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13092018>
- Barbosa-Núñez, J. A., Palacios, O. A., de-Bashan, L. E., Snell-Castro, R., Corona-González, R. I., & Choix, F. J. (2022). Active indole-3-acetic acid biosynthesis by the bacterium *Azospirillum brasilense* cultured under a biogas atmosphere enables its beneficial association with microalga. *Journal of Applied Microbiology*, 132(5), 3650–3663. <https://doi.org/10.1111/jam.15509>
- Barbosa-Núñez, J. A., Palacios, O. A., Mondragón-Cortez, P., Ocampo-Álvarez, H., Becerril-Espinosa, A., Nevárez-Moorillón, V. G., & Choix, F. J. (2023). Chemical and physical affinity of microalga-*Azospirillum* consortium co-cultured in suspension during CO<sub>2</sub> fixation from biogas. *BioEnergy Research*, 16(1), 579–592. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10411-7>
- Bose, A., Lin, R., Rajendran, K., O'Shea, R., Xia, A., & Murphy, J. D. (2019). How to optimise photosynthetic biogas upgrading: A perspective on system design and microalgae selection. *Biotechnology Advances*, 37(8), 107444. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107444>
- Cassán, F., Coniglio, A., López, G., Molina, R., Nievas, S., de Carlan, C. L. N., Donadio, F., Torres, D., Rosas, S., Pedroza, F. O., de Souza, E., Díaz Zorita, M., de-Bashan, L., & Mora, V. (2020). Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. *Biology and Fertility of Soils*, 56(4), 461–479. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01463-y>
- Contreras, C. A., Palacios, O. A., de-Bashan, L. E., & Choix, F. J. (2024). Microalga growth-promoting bacteria as strategy to improve CO<sub>2</sub> removal from biogas. *BioEnergy Research*, 17(4), 2082–2099. <https://doi.org/10.1007/s12155-024-10800-0>
- Contreras, C. A., Palacios, O. A., Garciglia-Mercado, C., de-Bashan, L. E., & Choix, F. J. (2025). Polyhydroxybutyrates production by *Azospirillum brasilense* as a microalgal growth promotion trait during CO<sub>2</sub> fixation from biogas. *Current Microbiology*, 82(12), 569. <https://doi.org/10.1007/s00284-025-04534-1>
- Devi, M. K., Manikandan, S., Oviyapriya, M., Selvaraj, M., Assiri, M. A., Vickram, S., Subbaiya, R., Karmegan, N., Ravindran, B., Chang, S. W., & Awasthi, M. (2022). Recent advances in biogas production using agro-industrial waste: A comprehensive review outlook of techno-economic analysis. *Bioresource Technology*, 363, 127871. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127871>
- Garciglia-Mercado, C., Contreras, C. A., Choix, F. J., de-Bashan, L. E., Gómez-Anduro, G. A., & Palacios, O. A. (2024). Metabolic and physiological adaptations of microalgal growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense* growing under biogas atmosphere: A microarray-based transcriptome analysis. *Archives of Microbiology*, 206(4), 173. <https://doi.org/10.1007/s00203-024-03890-z>
- Garciglia-Mercado, C., Palacios, O. A., Contreras-Godínez, C. A., Torres-Velázquez, J. R., & Choix, F. J. (2025). Transcriptomic response of *Azospirillum brasilense* co-cultured with green microalgae *Chlorella* sp. and *Scenedesmus* sp. during CO<sub>2</sub> biogas fixation. *Processes*, 13(7), 2177. <https://doi.org/10.3390/pr13072177>
- Goswami, R. K., Mehariya, S., & Verma, P. (2024). Advances in microalgae-based carbon sequestration: Current status and future perspectives. *Environmental Research*, 249, 118397. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118397>
- Palacios, O. A., López, B. R., & de-Bashan, L. E. (2022). Microalga growth-promoting bacteria (MGPB): A formal term proposed for beneficial bacteria involved in microalgal-bacterial interactions. *Algal Research*, 61, 102585. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102585>
- Pelayo-González, V. G., Palacios, O. A., Nevárez Moorillón, G. V., Ocampo Alvarez, H., Becerril Espinosa, A., & Choix-Ley, F. J. (2026). Photosynthetic modulation of *Chlamydomonas reinhardtii* microalga co-cultured with different strains of the growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense* during CO<sub>2</sub> fixation from biogas. *Journal of Applied Phycology*, 38(3), 1851–1861. <https://doi.org/10.1007/s10811-026-03848-2>
- Rosero-Chasoy, G., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguilar, C. N., Buitrón, G., Chairez, I., & Ruiz, H. A. (2021). Microbial co-culturing strategies for the production high value compounds, a reliable framework towards sustainable biorefinery implementation – An overview. *Bioresource Technology*, 321, 124458. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124458>