

**Sección:** ¿Cómo funciona?

# *El ciclo verde del biogás: microalgas y bacterias transformando desechos en bienestar local*

*The green biogas cycle: microalgae and bacteria transforming waste into local well-being*

---

Mario Longinos-Juárez<sup>1</sup>  
Wenceslao Bonilla-Blancas<sup>1\*</sup>  
Armando González Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, Laboratorio de Energías Alternas Renovables, Posgrado en Eficiencia Energética y Energías Renovables, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec de Morelos, C.P. 55210, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Autor para la correspondencia: [wcbonilla@tese.edu.mx](mailto:wcbonilla@tese.edu.mx)

## **RESUMEN**

El biogás producido por digestión anaerobia requiere la eliminación de gases contaminantes para mejorar su calidad energética y reducir impactos ambientales. El tratamiento biológico basado en comunidades microalga-bacteria permite eliminar estos contaminantes gracias a interacciones biológicas complementarias, mejorando la composición del biogás. Esta tecnología favorece a las comunidades al valorizar residuos orgánicos y generar energía limpia con bajos costos operativos. Su implementación en sistemas agropecuarios rurales contribuye a la autosuficiencia energética, reduce emisiones contaminantes y genera beneficios económicos, ambientales y sociales.

*Palabras clave: Biogás, tratamiento biológico, microalgas.*

---

## **SUMMARY**

Biogas produced through anaerobic digestion requires the removal of contaminant gases to improve its energy quality and reduce environmental impacts. Biological treatment based on microalgae-bacteria consortia enables the removal of these contaminants through complementary biological interactions, improving biogas composition. This technology benefits communities by valorizing organic waste and generating clean energy at low operational costs. Its implementation in rural agro-livestock systems contributes to energy self-sufficiency, reduces pollutant emissions, and generates economic, environmental, and social benefits.

*Keywords: Biogas, biological treatment, microalgae.*

## ¿Sabías que diez vacas pueden producir energía suficiente para cocinar durante todo un año?

En muchas comunidades rurales y agroindustriales, los residuos agrícolas y el estiércol del ganado suelen ser considerados como un problema o simplemente como basura. Si los miramos desde otra perspectiva – la de la biotecnología-, estos desechos pueden convertirse en algo mucho más valioso: una fuente constante de energía renovable llamada biogás.

El biogás se genera de forma natural cuando la materia orgánica se descompone en la oscuridad y en total ausencia de oxígeno, mediante un proceso biológico fascinante llamado digestión anaerobia (DA). Este ocurre dentro de contenedores cerrados donde millones de microorganismos trabajan en “equipo”, descomponiendo la materia orgánica y liberando una mezcla de gases rica en metano ( $\text{CH}_4$ ). Y aquí está la clave: el  $\text{CH}_4$  es un combustible potente, capaz de usarse para cocinar o incluso generar electricidad.

No obstante, el biogás no viene solo, con el  $\text{CH}_4$ , también se generan otros gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el famoso – y sumamente problemático- sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Un punto crucial es que el biogás “crudo”, tal como sale del digestor, no debería utilizarse directamente, estos gases funcionan como un lastre. El  $\text{CO}_2$ , por ejemplo, reduce su poder energético, como si intentáramos encender una fogata con leña húmeda. Por otro lado, el  $\text{H}_2\text{S}$  –ese gas con olor a huevo podrido- no solo es desagradable, también es altamente corrosivo. Puede dañar tuberías, oxidar motores desde adentro y, en concentraciones elevadas, representa un riesgo serio para la salud y el ambiente.

Por todo esto, tanto razones técnicas como por salud, el biogás debe ser sometido forzosamente a un proceso de tratamiento o purificación, comúnmente conocido como “lavado”, antes de poder ser aprovechado de forma segura, eficiente y rentable.

**Tabla 1.** Composición típica del biogás [1].

Componente	Concentración (%v/v)	Clasificación	Características comunes
$\text{CH}_4$	40-75	Componente principal	Gas combustible que genera la energía; es el componente que se desea aprovechar y no tiene olor
$\text{CO}_2$	25-60	Componente indeseable	Gas de efecto invernadero; no es combustible y, si está en altas concentraciones, reduce el poder calorífico del biogás.
$\text{CO}$	<0.2	Impureza menor	Gas altamente tóxico e invisible que se produce por combustiones incompletas.
$\text{O}_2$	1-5	Impureza menor	Gas indispensable para la vida, pero en el biogás representa un riesgo de explosión durante el almacenamiento.
$\text{N}_2$	0.01-5	Impureza menor	Gas inerte que diluye el poder del combustible y puede formar gases contaminantes al quemarse.
$\text{H}_2\text{S}$	<1	Contaminante crítico	Gas tóxico con un olor característico a huevo podrido; corrosivo para tuberías y motores.
$\text{NH}_3$	<0.025	Contaminante	Gas de olor penetrante que irrita las vías respiratorias y contribuye a la formación de lluvia ácida al quemarse.

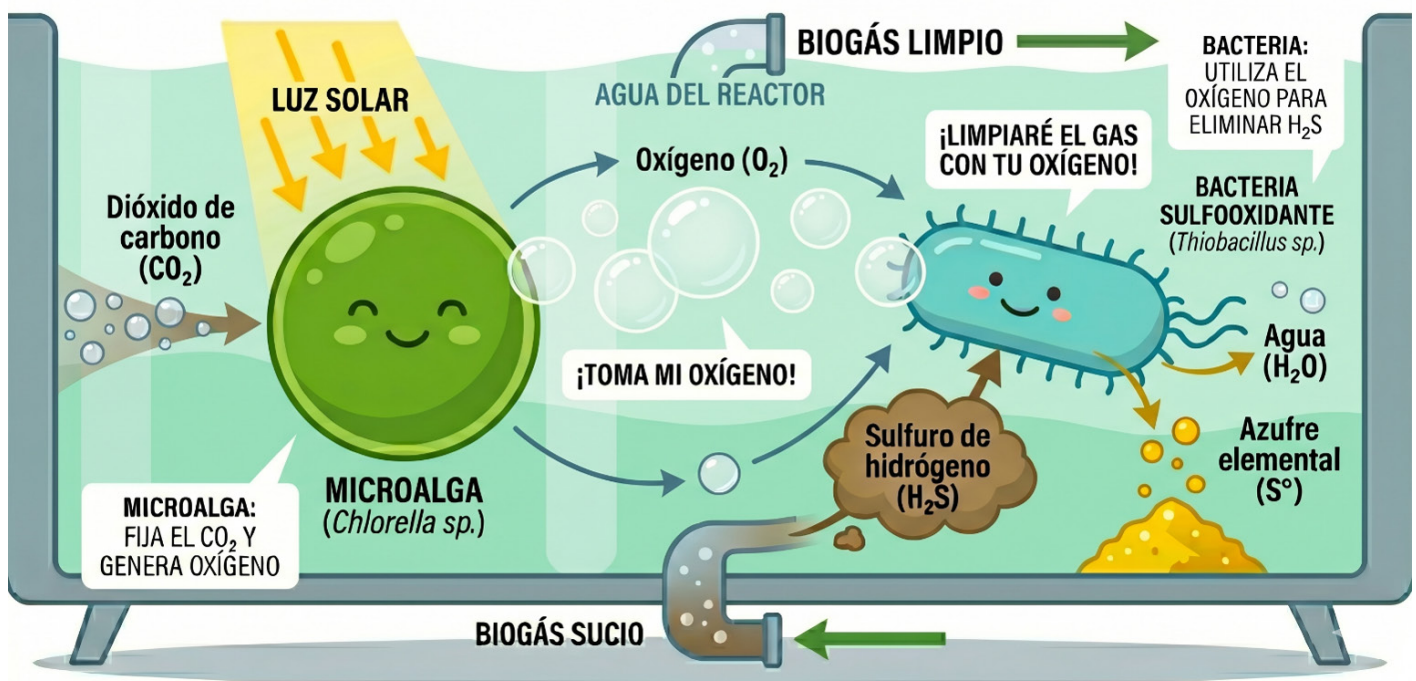
## Tecnologías para mejorar la calidad del biogás

A nivel industrial, existen diferentes métodos para mejorar la calidad del biogás. Las grandes plantas utilizan procesos fisicoquímicos bastante sofisticados para separar los contaminantes del metano. Entre los más comunes están la absorción y adsorción de gases a alta presión, la condensación, el lavado profundo con disolventes químicos y el uso de membranas especializadas para su filtración [2]. Y sí, estas tecnologías funcionan muy bien. Son rápidas, eficientes y ampliamente probadas. Pero también tienen un detalle importante: requieren equipos industriales muy especializados, mantenimiento constante y costos de operación muy elevados. En otras palabras, son poco accesibles para pequeñas granjas o comunidades rurales.

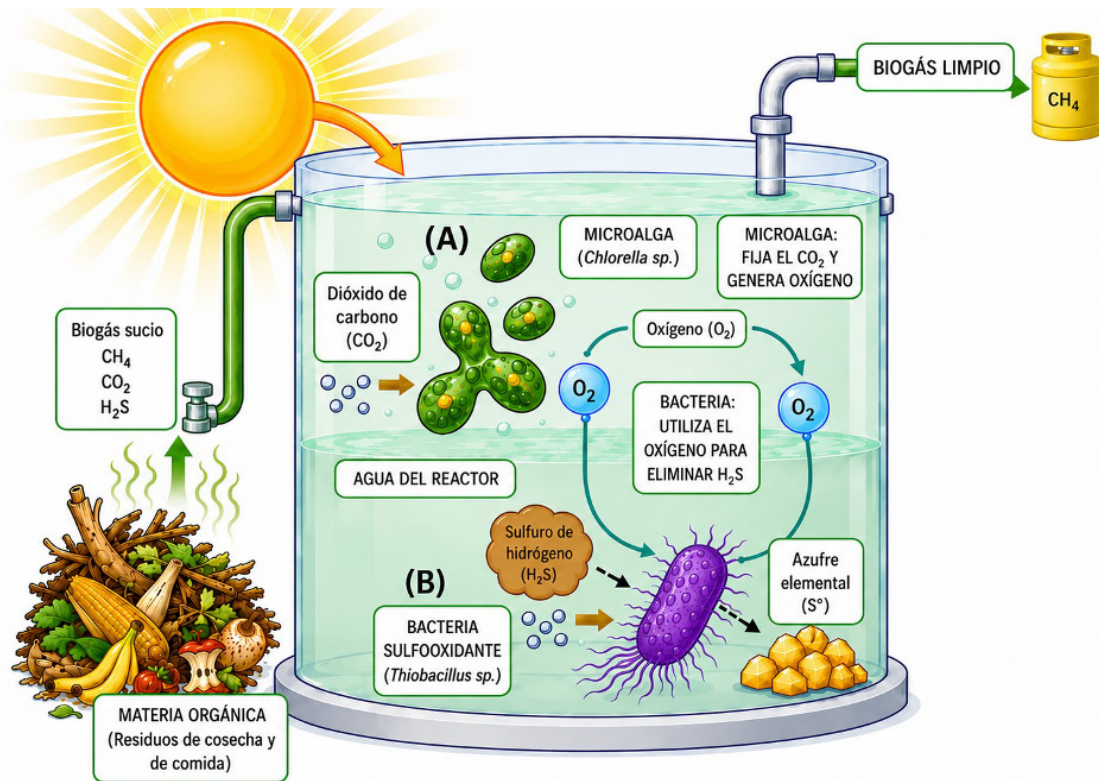
Aquí es donde entra una alternativa más interesante. En los últimos años, ha crecido exponencialmente el interés por los procesos

biológicos, que aprovechan algo mucho más simple: la capacidad natural de ciertos microorganismos para limpiar el biogás. Este enfoque no solo es más económico, sino también más fácil de implementar y mucho más sostenible. [3]. En esencia, se trata de aprovechar la convivencia e interacción estrecha de dos grandes aliados microscópicos: las microalgas y las bacterias. Juntas forman un pequeño pero poderoso sistema natural de purificación, capaz de devorar los contaminantes y mejorar de forma notable la calidad energética del biogás.

Si bien estos sistemas biológicos superan a los métodos fisico-químicos en cuanto a costos y sustentabilidad, también enfrentan ciertas limitaciones operativas que los ingenieros deben resolver con cuidado; la dependencia directa de las condiciones climáticas y de luz solar para sostener la fotosíntesis, la necesidad de grandes extensiones de terreno si se instalan estanques abiertos y la exigencia de mantener un control estricto de la temperatura y el pH del agua para evitar que el delicado



**Figura 1.** Representación gráfica de la asociación (consorcio) de las microalgas y bacterias sulfurooxidantes necesarias para el tratamiento del biogás, observándose *Chlorella sp.* (verdes) y *Thiobacillus sp.* (azules) en una dinámica interactiva de purificación.



**Figura 2.** Funcionamiento interno del reactor cerrado donde los microorganismos limpian el gas de forma natural; en la zona (A), las microalgas capturan el dióxido de carbono y la luz del sol para liberar el oxígeno que, en la zona (B), las bacterias aprovechan para eliminar el dañino sulfuro de hidrógeno, permitiendo que el propio sistema reutilice el carbono y el azufre como alimento para continuar su crecimiento.

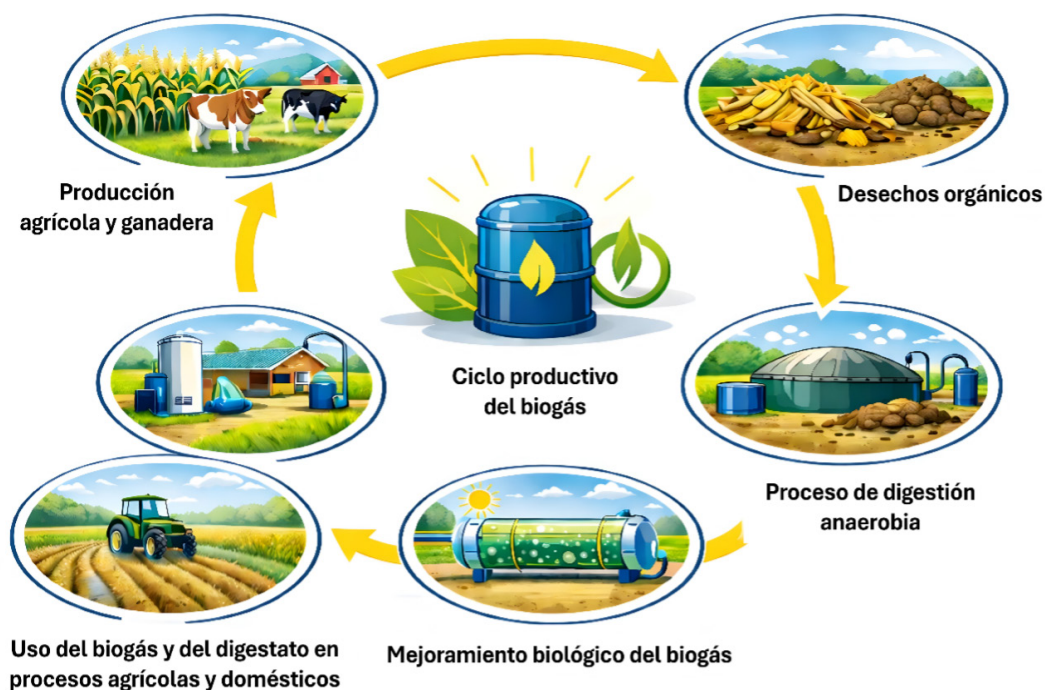
consorcio microbiano muera o pierda eficiencia, representan los principales desafíos técnicos para asegurar su estabilidad a largo plazo.

## Un sistema natural que limpia el biogás

Entender cómo funcionan estos sistemas biológicos es como asomarse a una pequeña obra maestra de la naturaleza. Todo comienza cuando el biogás “sucio” entra en contacto con agua -generalmente alcalina- donde habitan en perfecta armonía las microalgas y bacterias. Al burbujear dentro del líquido, los gases tóxicos se disuelven y quedan disponibles para ser transformados. Las microalgas operan como diminutos organismos vegetales microscópicos capaces de realizar la fotosíntesis y capturar luz solar para fijar el carbono, mientras que las bacterias actúan como catalizadores especializados que descomponen o

transforman sustancias específicas en el medio. Esta cooperación resulta crucial porque, al unir sus capacidades dentro del reactor, las microalgas absorben el dióxido de carbono y liberan el oxígeno indispensable para que las bacterias descompongan el sulfuro de hidrógeno, de modo que se genera un ciclo de beneficio mutuo que limpia el gas de forma natural.

Lo interesante es que aquí no hay desperdicio. La naturaleza cierra el ciclo: las microalgas aprovechan ese carbono (C) y el azufre ( $\text{S}^0$ ) generados como nutrientes para seguir creciendo y fortaleciéndose. Así, se establece una relación en la que todos ganan: mientras unos eliminan los contaminantes críticos, los otros aprovechan esos mismos residuos como alimento. El resultado es un proceso de purificación natural, eficiente y limpio, que mejora la calidad del biogás sin la necesidad de comprar químicos costosos ni generación de residuos



**Figura 3.** Esquema conceptual del ciclo de producción, tratamiento y aprovechamiento del biogás en sistemas agropecuarios. Los residuos orgánicos generados en la producción agrícola y ganadera se someten a digestión anaerobia para producir biogás. Posteriormente, el biogás puede ser mejorado mediante procesos biológicos para incrementar su calidad energética. Finalmente, el biogás y el digestato resultante pueden utilizarse en actividades agrícolas y domésticas, cerrando el ciclo de aprovechamiento de los residuos orgánicos.

industriales peligrosos.

Para llevar a cabo este proceso, los científicos e ingenieros utilizan biorreactores, que son sistemas donde se cultivan estos microorganismos que viven y trabajan bajo condiciones controladas. Algunos de estos reactores consisten en estanques abiertos, muy similares a pequeños canales de agua donde una rueda de paletas mantiene el líquido en movimiento constante, mientras que otros son reactores completamente cerrados, construidos con tubos transparentes que permiten un mayor control del proceso y protegen al cultivo de la contaminación externa [4].

## Una oportunidad para el sector rural

Aterrizar el tratamiento biológico del biogás tiene un potencial transformador enorme, especialmente en las zonas rurales. En muchas unidades agrícolas y ganaderas se generan

diariamente toneladas de residuos orgánicos, como el estiércol del ganado o los restos de las cosechas, que tradicionalmente se apilan al aire libre. Pero en realidad, todo ese material es una fuente de energía lista para aprovecharse.

Para ilustrar este potencial, imaginemos una pequeña unidad familiar que cuenta con diez vacas y cultiva una hectárea de maíz. Aunque parezca modesto, este sistema puede generar suficientes residuos orgánicos para producir hasta 10 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de biogás al día durante un año [5], [6], [7]. Y esta cantidad de energía es más que suficiente para cubrir necesidades y actividades cotidianas fundamentales, como la cocción diaria de los alimentos, el calentamiento de agua para el hogar o para las áreas de maternidad de los animales, e incluso para mantener en funcionamiento pequeños motores y equipos agrícolas.

Cuando este biogás se somete a un tratamiento biológico para la eliminación de sus contaminantes, su calidad energética da un salto impresionante. Gracias al trabajo conjunto de microalgas y bacterias, las concentraciones iniciales de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno que veíamos en la Tabla 1, logran transformarse radicalmente. El gas resultante alcanza composiciones típicas de biometano de alta pureza, caracterizadas por contener más del 90% de CH<sub>4</sub>, menos de un 10% de CO<sub>2</sub>, y lo más importante, una total y completa ausencia de H<sub>2</sub>S [8]. Este enriquecimiento permite un aprovechamiento energético muchísimo más seguro, eficiente y prolongado.

## Beneficios para las comunidades

El uso de biometano ofrece beneficios muy concretos. En primer lugar, representa un ahorro directo e inmediato en la economía de las familias, ya que reduce drásticamente su dependencia de la compra de tanques de gas LP o de la recolección exhaustiva de leña.

También se contribuye enormemente a mejorar la salud pública, ya que al purificar el biogás se elimina de tajo la exposición a humos molestos y se disminuye a cero la presencia de compuestos tóxicos como el H<sub>2</sub>S y el NH<sub>3</sub> dentro de los hogares y las áreas de trabajo.

Además, el ciclo es tan bondadoso que los residuos líquidos y sólidos que quedan dentro del digestor después de producir el gas, conocidos como digestato, se convierten en fertilizantes naturales de excelente calidad. Estos biofertilizantes ayudan a recuperar los nutrientes perdidos, mejoran la estructura y fomentan la biodiversidad del suelo, reduciendo la necesidad de comprar costosos y agresivos fertilizantes químicos. Esta tecnología, en su conjunto, transforma problemas en soluciones: convierte residuos orgánicos en energía útil, reduce las emisiones contaminan-

tes y promueve un uso mucho más inteligente y eficiente de los recursos que ya se tienen a la mano.

## Energía limpia a partir de residuos

El tratamiento biológico del biogás demuestra con hechos que los residuos agrícolas y ganaderos no son basura, sino que pueden y deben convertirse en una fuente valiosa de energía renovable. Gracias al incansable trabajo conjunto de las microalgas y las bacterias, es posible purificar el biogás de una forma completamente natural, accesible y altamente efectiva para mejorar su calidad para una gran variedad de usos.

En las comunidades rurales y el sector agroindustrial, esta tecnología representa una ventana de oportunidad invaluable para generar energía de forma local, abatir los costos de producción y darles un segundo aire a los residuos orgánicos. Al mismo tiempo, contribuye de manera activa a impulsar modelos sostenibles de economía circular que no solo fortalecen el cuidado ambiental, sino que detonan el desarrollo y la prosperidad local.

En conjunto, la adopción de estas estrategias biológicas en el tratamiento del biogás representa un nicho importante, tecnológico y ambiental para las comunidades rurales, no solo es una opción para mitigar el cambio climático al capturar los gases de efecto invernadero antes de que se liberen a la atmósfera, sino que también reemplaza los combustibles fósiles tradicionales por una alternativa limpia y renovable desarrollada localmente. Esta transición hacia modelos de economía circular transforma por completo la gestión de los residuos orgánicos, reduce la contaminación latente del agua y los suelos, y dota a la población de herramientas tecnológicas accesibles para proteger su entorno natural, impulsando un bienestar social duradero y un desarrollo económico verdaderamente sostenible.

## Agradecimientos

Mario Longinos Juárez agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca otorgada con el número EESP2025-0043. Esta investigación fue parcialmente financiada por el proyecto DGAPA-UNAM número IT100726. ChatGPT-5.3 (Open IA) se utilizó exclusivamente para la corrección gramatical ortografía y en la generación de material gráfico durante la preparación de este manuscrito sin comprometer su originalidad.

## Referencias

[1] Huynh Nhut, H., Le Thi Thanh, V., & Tran Le, L. (2020). Removal of H<sub>2</sub>S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 400–416. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.011>

[2] Atelge, M. R., Eraydin, A., Senol, H., Diaaeddin, M., Hanif, T., Rais, D. M., Abdulaziz, A., Eskicioglu, C., Muratçobanoğlu, H., Ünalán, S., Kalloum, S., Azbar, N., & Kivrak, H. D. (2021). A critical overview of the state-of-the-art methods for biogas purification and utilization processes. *Sustainability*, 13(20), 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>

[3] Hoyos, E. G., Lomanar, M. L., Blanco, S., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2025). Improving photosynthetic biogas purification via process aeration and nanoparticle supplementation. *Bioresource Technology*, 418, 131987. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131987>

[4] Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y., & Qi, X. (2020). Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109503. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503>

[5] Sheaffer, C., & Rosen, C. (2024, marzo). *Harvesting corn stover*. University of Minnesota Extension. <https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2024/03/harvesting-corn-stover.html>

[6] Dirección General de Sistemas de Información Agroalimentaria y Pesquera (DGSIAP). (s. f.). *Anuario estadís-*

*tico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado el 15 de diciembre de 2025, de [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/)

[7] Department of Agricultural Resources in a Grant to the Commonwealth of Massachusetts. (s. f.). *Manure inventory*. Center for Agriculture, Food, and the Environment, University of Massachusetts Amherst. Recuperado el 15 de diciembre de 2025, de <https://www.umass.edu/agriculture-food-environment/crops-dairy-livestock-equine/fact-sheets/manure-inventory>

[8] Longinos-Juárez, M. (2024). *Biofiltración alcalina de H<sub>2</sub>S contenido en biogás empleando un consorcio de microalga-bacteria* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de Tesis UNAM. [https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2024/abr\\_jun/0856458/Index.html](https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2024/abr_jun/0856458/Index.html)