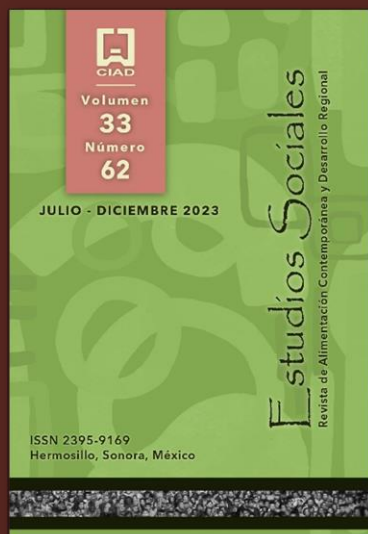


Estudios Sociales

Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional

Volumen 33, Número 62. Julio – Diciembre 2023

Revista Electrónica. ISSN: 2395-9169



Potencial de biogás, energía eléctrica, reducción de CO₂eq
y rentabilidad de biodigestor-motogenerador para establos lecheros en México

Biogas potential, electrical energy, CO₂eq reduction
and profitability of biodigester-motogenerator for dairy barns in Mexico

DOI: <https://doi.org/10.24836/es.v33i62.1374>
e231374

José Apolonio Venegas-Venegas*

<https://orcid.org/0000-0002-3855-8355>

René Pinto-Ruiz**

<https://orcid.org/0000-0003-1962-6874>

Francisco Guevara-Hernández**

<https://orcid.org/0000-0002-1444-6324>

Alberto Pérez-Fernández***

<https://orcid.org/0000-0002-9397-4167>

Deb Raj Aryal*

<https://orcid.org/0000-0003-4188-3084>

Fidel Alejandro Aguilar-Aguilar****

<https://orcid.org/0000-0003-3021-1186>

Fecha de recepción: 17 de mayo de 2023.

Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2023.

*Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-Universidad Autónoma de Chiapas, México.

**Universidad Autónoma de Chiapas. México.

***Autor para correspondencia: Alberto Pérez-Fernández. Universidad Autónoma del Carmen, México. Facultad de Ciencias Económicas Administrativas Calle 56, No. 4. Esq. Avenida Concordia. Col. Benito Juárez, Ciudad del Carmen. Campeche, México. C. P. 24180. Tel. (938) 3811018 ext. 2002. Dirección electrónica: apfernandez@pampano.unacar.mx

**** Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, México.

Resumen / Abstract

Objetivo: Identificar a los estados líderes en producción lechera en México con potencial para la producción de biogás y evaluar la rentabilidad de los sistemas de biodigestores-motogeneradores. **Metodología:** Se calculó el potencial de biogás, energía eléctrica y reducción de CO₂eq para la actividad lechera en México y se utilizó la metodología de proyectos de inversión de Baca para realizar un análisis financiero exhaustivo para cinco tamaños de establos lecheros propuesto. **Resultados:** México podría producir 1,649.5 millones de metros cúbicos de biogás al año, lo que se traduciría en 2,327.3 GWh de electricidad al año, suficiente para abastecer a más de un millón de habitantes y se estima una compensación de 10,044 Mt de emisiones de CO₂eq al año. Además, los establos más grandes, que albergan más de 2,000 cabezas de ganado, logran una recuperación de la inversión más rápida que sus homólogos más pequeños. **Limitaciones:** El estudio contempla el número de vacas lecheras por entidad federativa, ya que solo se dispone de información del número total de establos en México, pero no por entidad, lo que limita la especificidad de los resultados. **Conclusiones:** La implementación de sistemas biodigestores-motogeneradores se presenta como una estrategia viable, rentable y sustentable, alineando las necesidades energéticas con el cuidado ambiental en México.

Palabras clave: desarrollo regional; biodigestores; biogás; energía eléctrica; establos lecheros; análisis de rentabilidad.

Objective: To identify the leading Mexican states in milk production with potential for biogas production and to assess the profitability of biodigester-motogenerator systems. **Methodology:** The biogas potential, electric power potential and CO₂eq reduction for dairy farming in Mexico were calculated and the Baca's investment project methodology was used to perform a thorough financial analysis of five proposed dairy barn sizes. **Results:** Mexico could produce 1,649.5 million cubic meters of biogas per year, which would translate into 2,327.3 GWh of electricity per year, enough to supply more than one million inhabitants and it is estimated to offset 10,044 Mt of CO₂eq emissions per year. Moreover, the larger stables, housing more than 2,000 head of cattle, achieve a faster investment recovery than their smaller counterparts. **Limitations:** The study considers the number of dairy cows per federal entity, since information is only available on the total number of stables in Mexico, but not by entity, which limits the specificity of the results. **Conclusions:** The implementation of biodigester-motogenerator systems is presented as a viable, profitable, and sustainable strategy, aligning energy needs with environmental care in Mexico.

Key words: regional development; biodigesters; biogas; electrical energy; dairy barns; profitability analysis.

Introducción

El artículo titulado se estructura en seis apartados. El primero consiste en *Gases de Efecto Invernadero dentro de la actividad agropecuaria*, donde se analiza la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la actividad agropecuaria, desde la era preindustrial hasta la actualidad, y se discuten sus causas y consecuencias. Se hace especial hincapié en la cantidad de CO₂ equivalente emitida por metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O), los principales GEI derivados del manejo de estiércol, los cuales son respectivamente 28 y 265 veces más dañinos que el dióxido de carbono. El segundo apartado aborda *¿Cómo convertir un GEI en energía limpia en la actividad pecuaria?*, cómo el metano puede ser transformado en un combustible renovable mediante la tecnología de biodigestores, ofreciendo una alternativa sostenible para los sectores rurales. Esa tecnología permite capitalizar la abundante materia orgánica, tradicionalmente considerada un problema de contaminación y salud pública, para generar biogás. El biogás se utiliza, tanto como energía calórica como para la producción de electricidad en establos lecheros. Posteriormente, en el tercer apartado se examina *la importancia de la producción leche en México*, detallando a los principales productores, el volumen y valor de producción, y los empleos generados. También se argumenta la necesidad de adoptar tecnologías limpias en esta industria. En el cuarto apartado se especifica la *metodología* utilizada para calcular el potencial de biogás, energía eléctrica y

potencial de reducción de emisiones de CO₂eq para la actividad lechera en México, así como la utilizada para calcular la rentabilidad para cinco tamaños de establos lecheros propuesto. En un quinto apartado, se presentan los *resultados* de la investigación y se contrastan con los resultados más destacados que han publicado diversos autores a nivel nacional y mundial, en estudios similares. Finalmente, en el sexto apartado se presentan las *conclusiones*, en las cuales se hace hincapié de la importancia económica de la actividad lechera en México y cómo los establos lecheros pueden convertir sus desechos en energía limpia y sostenible con el uso de biodigestores tipo laguna, además que con el sistema biodigestormotogenerador se obtienen beneficios sociales, económicos y ambientales.

Gases de Efecto Invernadero dentro de la actividad agropecuaria

Importancia de los Gases de Efecto Invernadero.

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) se encuentran en la atmósfera tanto de forma natural como por origen antropogénico. Los gases absorben y emiten radiación infrarroja, lo que causa el efecto invernadero. De acuerdo con el Protocolo de Kioto, los seis principales GEI son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Benavides y León, 2007; IPCC, 2013). El incremento en las concentraciones de estos GEI está provocando un aumento de la temperatura global con impactos negativos para el entorno socioambiental (Olivo y Soto-Olivo, 2010).

Hay que destacar que la concentración de los principales GEI en la atmósfera ha experimentado un crecimiento considerable en los últimos 273 años, debido, principalmente, a actividades de origen antropogénico. Hasta la era industrial, la concentración de los tres principales GEI (CH₄, CO₂ y N₂O) permanecía constante. Antes del año 1750, la concentración de CO₂ era de 280 partes por millón (ppm), mientras que para el año 2022 esta se incrementó a 419 ppm, lo que supone un aumento del 49.6%. El incremento de este GEI se debe a la quema de combustibles fósiles, al uso indiscriminado de leña para generar energía térmica, a la tala y quema de bosques, y a la producción de cemento.

En ese mismo año, la concentración de CH₄ era de 722 partes por billón (ppb) y para el año 2022 alcanzó las 1923 ppb, lo que representa un significativo incremento del 166.3%, debido a la fermentación entérica, la gestión de estiércol, las emisiones derivadas de la extracción de combustibles fósiles, el cultivo de arroz y las emisiones de vertederos. Además, la concentración de N₂O era de 270 ppb y para 2022 aumentó a 336 ppb, incrementándose en un 24.4% debido a la producción de amoníaco para fertilizantes químicos, emisiones de suelos agrícolas y la combustión de combustibles fósiles (Benavides y León, 2007; SEMARNAT e INECC, 2012; IPCC, 2013; USNOAA, 2023).

A nivel mundial, el sector agrícola (que incluye la agricultura y la ganadería) aporta de manera significativa su contribución a los GEI. Estas emisiones, en el año 2020, fueron de 1.5 billones de toneladas de CO₂eq liberadas a la atmósfera. Aproximadamente el 57% de ellas corresponde a actividades relacionadas con la ganadería, de las cuales el 39% se debe a la fermentación entérica y el 9% al manejo de estiércol. Los productos generados en la ganadería también contribuyen a la emisión de CO₂eq; por ejemplo, la producción de carne de bovino genera 30 kg de CO₂eq por kilogramo, la de ovino 24 kg de CO₂eq por kilogramo, la de cerdo 1.8 kg de CO₂eq por kilogramo y la de pollo 0.6 kg de CO₂eq por kilogramo. Asimismo, la producción de leche de vaca genera 1 kg de CO₂eq por kilogramo y la de oveja 5.6 kg de CO₂eq por kilogramo (FAO, 2022).

En México, los principales GEI generados son el CO₂ con un 55%, el CH₄ con un 33%, el N₂O con un 8% y los HFCs con un 4%. Los principales emisores de GEI son la generación de energía con un 64%, la Agricultura junto con el Uso de Tierra, Cambio de Uso de Tierra y

Silvicultura (UTCUTS) con un 19%, los Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP) con un 10%, y los Residuos con un 7%. La categoría de Agricultura junto con UTCUTS generó un total de 140,807.24 Gg de CO₂eq en 2019.

De este total, la fermentación entérica, que es un proceso natural de los rumiantes, representó el 58% con 82,287.31 Gg de CO₂eq, de los cuales el 100% fue CH₄. Mientras tanto, el manejo de estiércol en México generó el 20% de las emisiones de la categoría Agricultura y UTCUTS, con un total de 27,984 Gg de CO₂eq, de los cuales el CH₄ representó el 71% y el N₂O el 29%. Es relevante mencionar que el manejo de estiércol y el uso de fertilizantes químicos generan dos de los GEI más dañinos: el CH₄, con un Potencial de Calentamiento Global (PCG) 28 veces más

alto que el CO₂, y el N₂O, con un PCG 265 veces mayor que el CO₂ (Semarnat e INECC, 2022; Saynes, Etchevers, Paz, y Alvarado, 2016).

La generación de energía es otro de los principales emisores de GEI en el mundo, especialmente en lo que respecta a la electricidad. Según la U. S. Energy Information Administration (EIA, 2021), el 61.4% de la energía eléctrica a nivel mundial en el año 2020 fue generada por fuentes de origen fósil. En México, la generación de electricidad y calor, donde se emplean combustibles fósiles, emitió 171,397.386 Gg de CO₂eq, lo cual representó el 23% de las emisiones totales del país (Semarnat e INECC, 2022). La agricultura y la producción pecuaria aportan significativamente a las emisiones de GEI de origen antropogénico en la atmósfera, las cuales contribuyen al calentamiento global y al cambio climático (Carmona, Bolívar, y Giraldo, 2005; Hernandez-De Lira, Huber, Espinosa-Solares, y Balagurusamy, 2015). Cada año, se generan grandes cantidades de residuos agrícolas y estiércol animal en el mundo, lo que constituye un grave problema ambiental que requiere un manejo adecuado (Almomani y Bhosale, 2021).

¿Cómo convertir un GEI en energía limpia en la actividad pecuaria?

Alternativas para convertir el problema de contaminación en energía renovable en la actividad pecuaria.

La Digestión Anaeróbica (DA) representa una estrategia innovadora que permite la gestión eficaz de desechos de la actividad pecuaria, mitigando así los impactos ambientales. Esta tecnología es clave en la disminución de emisiones de metano (CH₄), un potente gas de efecto invernadero, que se libera durante la descomposición natural del estiércol (Solano, 2019; Alvarado, De Oliveira, De Oliveira, Damasceno, y Alvez, 2020; Ngo, Ball, y Shamsavari, 2021). Además, la DA facilita la producción de biogás, reconocido como una fuente de energía renovable y sostenible, que contribuye significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero al reemplazar combustibles fósiles en la generación de calor y electricidad (Benali, Hamad, y Hamad, 2019; Solano, 2019; Alvarado et al., 2020; Ngo et al., 2021; Sanaye y Yazdani, 2022). Según Ngo et al. (2021), el tratamiento

de una tonelada de desechos mediante la DA puede resultar en una disminución de 0.143 toneladas de equivalente de CO₂.

El uso de biodigestores, un elemento esencial de la DA, se ha posicionado como una solución económica y ecológica para el manejo de residuos a nivel global. Su implementación no solo permite recuperar una cantidad significativa de energía con viabilidad económica, sino que también satisface una diversidad de necesidades energéticas. Al procesar sustratos biodegradables, como residuos vegetales y estiércol, se produce biogás y, adicionalmente, se genera un subproducto valioso: el biofertilizante (FAO, 2019; CEPAL, 2019). La tecnología de los biodigestores, por tanto, emerge como un recurso prometedor para la creación de un ciclo de energía sostenible y la valorización de desechos orgánicos en el ámbito rural.

La implementación de sistemas de biodigestión para la producción de biogás y biofertilizantes enriquece el entorno rural, otorgando un mayor valor a sus prácticas y contribuyendo al desarrollo económico y al mejoramiento de la calidad de vida tal como lo señalan Roslee et al. (2021) y Alvarado y colaboradores (2020). Además, estos sistemas son cruciales para la generación de energía y la gestión de saneamiento, aspectos fundamentales para el progreso de cualquier sociedad. En la actualidad, la diversidad de materiales utilizados para la construcción de biodigestores es amplia, incluyendo geomembranas de polietileno, caucho flexible, concreto, acero al carbono, poliestireno expandido, acero inoxidable y plástico, reflejando una adaptabilidad a diferentes contextos y necesidades (CEPAL, 2019; FAO, 2019). De acuerdo con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP, 2017). En México, la preferencia se inclina hacia los biodigestores tipo laguna, que representan el 81% de los implementados, seguidos por los modulares y los reactores laguna.

Los biodigestores tipo laguna, en particular, se benefician de la infraestructura existente de lagunas de tratamiento de efluentes, que se modifican con una cubierta de geomembrana para la captura de biogás, optimizando el proceso de digestión anaeróbica (FAO, 2019). Las instalaciones son altamente beneficiosas en granjas lecheras; el biogás producido puede usarse directamente como fuente de calor en aplicaciones como iluminación, calefacción, cocinas y calderas, mejorando las operaciones de saneamiento y el procesamiento de productos lácteos. Además, el biogás sirve como combustible para motores y para la generación de energía eléctrica, mientras que el biofertilizante derivado puede convertirse en un producto comercial viable (Molina, Molina, Espinoza, Contreras, y López, 2020; Barrena, Salazar, Gosgot, Ordinola, y Huanes, 2019; Martínez-García et al., 2020;

Velásquez-Piñas, Calle-Roalcaba, Miramontes-Martínez, y Alonso, 2023; CEPAL, 2019). La tecnología, ampliamente adoptada tanto en Estados Unidos como en América Latina (Martí, Pino y Víquez, 2017; Williams et al., 2020), destaca por su capacidad de proporcionar energía renovable constante, al contrario de las intermitencias propias de las fuentes solares y eólicas (Williams et al., 2020).

Entre 2005 y 2010, México vio la instalación de 720 biodigestores del tipo laguna, de los cuales el 72% se estableció bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto, marcando un hito en la adopción de tecnologías sustentables (FIRCO, 2011). En un impulso paralelo, el FIRCO inició en 2006 un programa piloto que puso en funcionamiento nueve motogeneradores movidos por biogás en granjas porcinas de Jalisco, Sonora y Nuevo León, una iniciativa pionera en la producción de electricidad renovable (FIRCO, 2007). La estrategia no solo ha incrementado la eficiencia energética, sino que también ha reforzado la competitividad y rentabilidad del sector agropecuario, y para 2018, se reportaron 160 establos lecheros equipados con esta tecnología operativa, según Gutiérrez (2018).

Según datos de la United State Agency for International Development y el International Renewable Resources Institute of Mexico (USAID e IRRI, 2015), existen 2,167 biodigestores en México, distribuidos estratégicamente entre el sector doméstico (36.9%), el sector productivo (7.6%), y el sector industrial (55.5%), este último con capacidades que superan los 1000 m³. Dentro de este segmento industrial, 640 biodigestores se beneficiaron del apoyo del Mecanismo de Desarrollo Limpio, 317 recibieron apoyo de la Sagarpa y 302 contaron con financiamiento privado. Estos biodigestores industriales están diseñados para producir biogás en volumen suficiente para operar motogeneradores y suministrar energía eléctrica, contribuyendo significativamente al perfil energético de los agronegocios.

La transición hacia energías renovables, en particular la generación de electricidad a partir de biogás, es cada vez más imperativa, y el biogás emerge como una solución significativa (García y Masera, 2016). Globalmente, la capacidad instalada para la generación de electricidad mediante biogás alcanza los 15 GW, con la Unión Europea a la cabeza con más de 10 GW, seguida por

América del Norte con 2.4 GW, Asia con 711 MW, América del Sur con 147 MW y África con 33 MW, lo que subraya la relevancia internacional de esta fuente de energía, reflejando un panorama energético en crecimiento y diversificación hacia fuentes más sostenibles (Scarlat, Dallemand, y Fahl, 2018).

Importancia de la producción de leche en México

La ganadería bovina, enfocada en la producción de leche, es una actividad económica fundamental para casi 150 millones de hogares a nivel global, siendo especialmente crítica en naciones en desarrollo. La lechería no solo apoya los sustentos y mejora la seguridad alimentaria y nutricional de las familias, sino que también desempeña un rol vital en la economía agrícola (FAO, 2023). En términos de producción, el mundo ve una producción anual de 886.86 millones de toneladas de leche. La India lidera la producción global con el 20.74%, seguida por Estados Unidos con el 11.42%, Pakistán con el 6.85%, China con el 4.42% y Brasil con el 4.15%. México se posiciona en el décimo quinto lugar, contribuyendo con el 1.44% de la producción mundial de leche (FAO, 2022).

En el contexto mexicano, la producción de leche de bovino representa la tercera actividad económica más relevante dentro del sector alimentario, aportando el 17.22% del valor de producción nacional, superada únicamente por la producción de carne de bovino (30%) y de ave (23%) (SE, 2012; Sagarpa, 2018). Con más de 200 mil empleos directos y permanentes, esta industria es una fuente significativa de empleo remunerado. Adicionalmente, sumando la producción nacional a las importaciones, el consumo per cápita de leche en México alcanza los 134 litros (Sagarpa, 2018).

La producción lechera en México se destaca por su vitalidad y tradición dentro del sector agropecuario. Entre 2011 y 2020, el inventario nacional de vacas lecheras creció de 2,382,443 a 2,606,311 cabezas, registrando un incremento promedio anual del 1%. En 2021, la producción alcanzó los 12,852 millones de litros, valorados en 90,824 millones de pesos, según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023). A pesar de este crecimiento, la producción interna no satisface la demanda del país. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader, 2019), México encabeza las importaciones de leche en polvo a nivel global y se sitúa en quinto lugar en importaciones de leche fluida. En 2018, las importaciones equivalieron a 3,740 millones de litros entre leche en polvo y fluida, con 360 mil toneladas de leche descremada en polvo, convirtiendo al país en el mayor importador de este producto (CEDRSSA, 2019). La continuación de las importaciones masivas puede desestabilizar el mercado interno, afectando el precio de la leche fresca y llevando al cierre de unidades

productivas locales (Espinoza-Arellano, Fabela-Hernández, López-Chavarría, y Martínez-Gómez, 2019). Ante este escenario, es imperativo que todos los sistemas de producción lechera mejoren sus índices de productividad, se integren efectivamente a las cadenas de valor, corrijan deficiencias y busquen la tecnificación y capacitación en gestión (Loera y Banda, 2017). Implementar estas medidas podría significar un aumento sustancial en la productividad, rentabilidad y competitividad de los establos lecheros en México.

En este contexto, una solución viable para los establos lecheros es la adopción de tecnologías como los sistemas de biodigestión y motogeneración. Tal estrategia no solo mejora la productividad y la rentabilidad, sino que también reduce significativamente los costos operativos al generar electricidad. Dado que la energía eléctrica es uno de los principales costos en la producción, la conversión de excretas en electricidad puede resultar en ahorros sustanciales para las explotaciones ganaderas, como indican los estudios de Vera-Romero, Estrada-Jaramillo, Martínez-Reyes, y Ortiz-Soriano (2015); Venegas, Espejel, Pérez, Castellanos, y Sedano, (2017); y Velásquez-Piñas et al. (2023).

Metodología

Para estimar la producción de biogás, es crucial contar con datos precisos sobre el inventario de vacas lecheras, especialmente en los principales estados productores de leche de México. La información suministrada por el SIAP (2023) y CEDRSSA (2019) indica que hay 3,059 establos lecheros en el país. Siguiendo la clasificación de Gasque y Blanco (2001), en México se identifican cuatro categorías de producción lechera: especializada (51%), semiespecializada (21%), familiar (10%) y de doble propósito (18%). En promedio, un establo de producción lechera especializada maneja 230 vientres, con una variación que va desde 100 hasta 3,000. Para llevar a cabo un análisis de rentabilidad sobre la inversión en sistemas de biodigestores y motogeneradores, se propone evaluar establos lecheros especializados de distintos tamaños: 200, 500, 1,000, 2,000 y 3,000 vientres.

Una vez que se tiene el número de vacas lecheras por estado, se puede calcular el potencial de producción de metano utilizando las fórmulas desarrolladas por Chen (1983); Hashimoto, Chen, y Varel, (1981); y Hashimoto (1984), que Venegas,

Arial, y Pinto, (2019) aplicaron en sus estudios. Estas fórmulas consideran variables como la cantidad de estiércol producido, la composición del estiércol, la temperatura de digestión y el tiempo de retención, entre otras, para estimar la cantidad de metano que se podría generar.

La conversión de estos datos en información aplicable para la toma de decisiones permitirá a los establos lecheros especializados en México valorar la viabilidad y los beneficios económicos de implementar tecnologías de biodigestión y motogeneración, con el objetivo de hacer más sostenible y rentable su producción.

$$V_{CH_4} = BoSV \left[1 - \frac{K}{\mu_m \theta - 1 + K} \right]$$

Donde V_{CH_4} es el Volumen de metano producido en el biodigestor ($m^3 \text{ día}^{-1}$); Bo es el potencial de producción de metano ($m^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1}$ de SV) acorde con lo establecido por el IPCC (2006) del capítulo 10, volumen 4; SV sólidos volátiles ($\text{kg materia seca animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$); θ es el tiempo de retención hidráulico de acuerdo con especificaciones de Lagrange (1979); K y μ_m representan respectivamente el parámetro cinético y la tasa máxima de crecimiento específico por día (%), determinados por Hashimoto (1984).

Tras calcular la producción de metano, se procedió a estimar el potencial de generación de energía eléctrica siguiendo la metodología establecida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2006, por sus siglas en inglés), la cual ha sido aplicada en estudios previos como los de Casas et al. (2009), Venegas et al. (2017) y Venegas et al. (2019).

$$kWh/año = CH_4 * 1,010 \text{ Btu}/ft^3 \text{ CH}_4 * kWh/3413 \text{ Btu} * 0.25 * 0.9$$

Para la estimación del potencial energético se utilizaron las siguientes variables: $kWh \text{ año}^{-1}$, que denota kilovatios-hora por año; CH_4 , que representa el metano generado; el contenido de

Unidades Térmicas Británicas (BTU) por pie cúbico de metano, asignándole un valor estándar de 1,010 (ft^{-3}); una eficiencia de conversión de metano a electricidad del 25%; y una eficiencia de transmisión de 90%.

El impacto ambiental, específicamente el potencial de reducción de equivalentes de CO_2 , se cuantificó siguiendo la metodología prescrita por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2013, por sus siglas



en inglés). El cálculo comenzó estableciendo una línea base que refleja el nivel de emisiones asociado con la producción lechera por estado, expresado en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq).

$$BE_{CH_4,y} = GWP_{CH_4} * D_{CH_4} * \sum MCF_j * B_{0,LT} * N_{LT} * VS_{LT,y} * MS\%_{BI,j}$$

Donde: BE_{CH₄,y} Emisiones de línea base en el año “Y”, GWP_{CH₄} Potencial de Calentamiento Global (tCH₄ tCO₂⁻¹), D_{CH₄} Densidad del metano t m⁻³, LT Índice para todo tipo de ganado, Índice por sistema de manejo de residuos, MCF_j Factor de conversión anual de metano (%), B_{0,LT} Potencial de producción de metano (m³CH₄ kg⁻¹ de SV), N_{LT,y} Promedio anual vacas, VS_{LT,y} sólidos volátiles (kg materia seca animal⁻¹ día⁻¹), MS%_{BI,j} Fracción de manejo de estiércol en la línea base del sistema de manejo de estiércol por animal (%).

En segundo lugar, se calculó el potencial de reducción de emisiones que se puede alcanzar con el uso de biodigestores tipo laguna con la siguiente relación:

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y,$$

Donde: BE_y Emisiones de Línea Base (t CO₂eq), PE_y Emisiones por combustión de metano y por autoconsumo de energía eléctrica (t CO₂eq) y LE_y Emisiones por fugas (t CO₂eq).

El cálculo del consumo de energía eléctrica para los cinco tamaños de establos lecheros propuestos se basó en datos proporcionados por Hernández-Anaya, Ruesga-Gutiérrez, OlmosCornejo, y Cortes-López (2018), quienes realizaron un promedio para diferentes tamaños de establos lecheros en Jalisco. Para fines de referencia, se consideró el consumo de un establo promedio que albergaba 280 vacas.

En el análisis se incluyeron biodigestores tipo laguna de capacidades de 580, 1,450, 2,900, 5,800 y 8,700 m³, junto con motogeneradores de 30, 60 y 127 kWh. Cada sistema se evaluó en términos de inversión y costos de mantenimiento tanto para el biodigestor como para el motogenerador. Se asumió una operación continua de 15 horas al día durante los 365 días del año para los motogeneradores, siguiendo el enfoque de Escalera, Gallegos, y Leal, (2014), quienes analizaron la rentabilidad de un motogenerador de 60 kWh bajo estas condiciones operativas.

Además, se consideró como ingreso la energía eléctrica generada por el motogenerador. Para este propósito, se tomó como referencia la tarifa OM de la

Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la cual se añadió un cargo promedio por kilovatio de demanda máxima de cada granja, con un precio estimado de \$2.43kW. Este precio se utilizó como base para calcular el ingreso por ahorro de electricidad. Asimismo, se incluyó en el cálculo como ingreso la venta de biofertilizante, cuyo precio, según Venegas et al. (2019), se estima en \$ 900 por tonelada en la zona central de México.

El análisis de rentabilidad se llevó a cabo utilizando la metodología propuesta por Baca (2013). Se calcularon tres indicadores clave: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la Relación Beneficio-Costo (B/C), con una tasa de actualización del 11.06%. Esta tasa se seleccionó como referencia para evaluar la viabilidad económica del proyecto.

De acuerdo con Velásquez-Piñas et al. (2023), la decisión de implementar un proyecto de biogás debe basarse en indicadores económicos tradicionales como el VAN y la TIR. Además, es esencial que las evaluaciones económicas consideren el valor del dinero en el tiempo, lo que implica tener en cuenta la tasa de descuento, como lo recomienda Vera et al. (2015). Estos indicadores proporcionan una visión integral de la rentabilidad y viabilidad financiera del proyecto, lo que facilita la toma de decisiones informadas al respecto.

Resultados y discusión

Con una población de 2,606,311 vacas productoras de leche registradas en México en 2020, según los datos del SIAP (2023), existe un significativo potencial para la generación de biogás, que asciende a 1,649.5 millones de metros cúbicos anuales. Esto equivale a un promedio de 1.73 metros cúbicos de biogás por día por cada vaca lechera en el país. Es importante destacar que los estados de Jalisco, Chihuahua, Durango y Coahuila representan conjuntamente el 49.12% de este potencial total en México, con valores promedio de 1.81, 1.71, 1.70 y 1.83 metros cúbicos por día por vaca, respectivamente.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, como la de Casas et al. (2009), que calculó un potencial de 1.73 metros cúbicos por día en Delicias, Chihuahua; Pizarro, Mulbry, Blerch, y Kangas (2006), quienes reportaron dos

metros cúbicos diarios en Maryland, Estados Unidos; Mantilla, Duque y Galeano, (2007), que estimaron 1.87 metros cúbicos al día en Colombia; y Vera (2011), quien calculó un potencial de 1.8 metros cúbicos diarios en Tizayuca, Hidalgo. Estos datos respaldan la viabilidad del aprovechamiento del biogás en la producción de leche a nivel nacional e internacional.

Cuadro 1.

Potencial de biogás y energía eléctrica en la actividad lechera de México

Estado	Cabezas de ganado	^β Biogás (m ³ año ⁻¹)	^Ω Energía Eléctrica (MW año ⁻¹)	Representación (%)
Aguascalientes	77,955	47,383,217	66,854	2.87
Baja California	43,550	29,500,557	41,623	1.79
Coahuila	256,249	171,724,557	242,290	10.41
Chiapas	31,575	21,976,284	31,007	1.33
Chihuahua	299,932	187,217,295	264,149	11.35
Durango	314,720	195,769,847	276,216	11.87
Guanajuato	200,916	127,036,575	179,239	7.70
Hidalgo	198,027	121,356,732	171,225	7.36
Jalisco	386,899	255,589,940	360,617	15.49
México	100,878	45,161,001	63,719	2.74
Michoacán	67,008	43,411,951	61,251	2.63
Puebla	178,066	109,966,625	155,154	6.67
Querétaro	116,614	73,506,546	103,712	4.46
Veracruz	62,720	42,833,729	60,435	2.60
Zacatecas	84,479	50,179,010	70,799	3.04
Resto	186,723	126,907,523	179,056	7.69
Total	2,606,311	1,649,521,387	2,327,344	100.00

Fuente: elaboración propia ^βCon base en fórmulas de Chen (1983), Hashimoto et al. (1981) y Hashimoto (1984).

Considerando una concentración de CH₄ del 60% en la composición del biogás. ^ΩCon base en la fórmula de USEPA (2006).

México presenta un significativo potencial de generación de 2,327.3 GW de energía eléctrica anual, según los resultados obtenidos (ver Cuadro 2). Es importante destacar que este potencial está directamente relacionado con la producción de

biogás; los cuatro principales estados contribuyentes son los mismos: Jalisco, Chihuahua, Durango y Coahuila. En cuanto al consumo de electricidad per cápita en México, se registró un promedio de 2,256.94 kilovatios-hora (kWh) en 2019 y 2,220.52 kWh en 2020, lo que representa una disminución del 1.61% (SENER, 2021). Considerando este valor de referencia, el potencial de generación de energía eléctrica a partir de la actividad lechera podría cubrir las necesidades de consumo de 1,048,108 personas anualmente.

Cuadro 2.

Línea base y potencial de reducción de emisiones de CO₂eq en la actividad lechera de México

Estado	Cabezas de ganado	Línea base por emisión de estiércol t (CO ₂ eq)	Potencial de reducción de emisiones (t CO ₂ eq)	Representación (%)
Aguascalientes	77,955	385,703	300,418	2.99
Baja California	43,550	215,475	167,822	1.67
Coahuila	256,249	1,267,859	987,558	9.83
Chiapas	31,575	156,226	121,671	1.21
Chihuahua	299,932	1,483,992	1,155,911	11.51
Durango	314,720	1,557,159	1,212,904	12.08
Guanajuato	200,916	994,084	774,306	7.71
Hidalgo	198,027	979,790	763,172	7.60
Jalisco	386,899	1,914,284	1,491,080	14.85
México	100,878	499,120	388,763	3.87
Michoacán	67,008	331,540	258,228	2.57
Puebla	178,066	881,028	686,243	6.83
Querétaro	116,614	576,978	449,409	4.47
Veracruz	62,720	310,324	241,703	2.41
Zacatecas	84,479	417,982	325,561	3.24
Resto	186,723	923,861	719,327	7.16
Total	2,606,311	12,895,403	10,044,077	100.00

Fuente: elaboración propia con base en la metodología ACM0010 de la UNFCCC (2013).

Los resultados de esta investigación indican que un metro cúbico de CH₄ generado en un biodigestor tipo laguna tiene un promedio de capacidad para generar 2.45 kilovatios de energía eléctrica en México. Los hallazgos concuerdan con investigaciones anteriores, como la realizada por Casas et al. (2009), que reportó una generación de 2.3 kilovatios por metro cúbico de biogás en establos lecheros en Delicias, Chihuahua. También se alinean con los resultados de Vera-Romero, Martínez-Reyes, Estrada-Jaramillo, y Ortiz-Soriano (2014), que estimaron 2.85 kilovatios de energía eléctrica en la región Ciénega del estado de Michoacán, y con los datos de Pinto et al. (2023), quienes calcularon una generación de 2.15 kilovatios por metro cúbico de metano en Brasil.

Es fundamental destacar que la preservación del medio ambiente se ha convertido en una prioridad en la actualidad. Los acuerdos de París, conocidos como COP 21 y COP 24 en Katowice 2018, han reforzado las acciones a corto plazo destinadas a la mitigación y adaptación al cambio climático. Los acuerdos enfatizan la necesidad de transitar de los combustibles fósiles a fuentes de energía limpia como un camino crucial para lograr reducciones significativas de gases de efecto invernadero a nivel global (Solano, 2019). En consecuencia, el compromiso de la humanidad se centra en la preservación del planeta y la búsqueda constante de estrategias que contribuyan a mejorar las condiciones ambientales.

El empleo de biodigestores tiene un impacto significativo en la reducción de la contaminación ambiental. Los resultados de esta investigación revelan que la actividad lechera en México podría lograr una reducción potencial de 10,044 millones de toneladas de CO₂eq mediante el uso de biodigestores, lo que representa aproximadamente el 77% de las emisiones totales de CO₂eq generadas por esta actividad.

Los cálculos de la línea base arrojaron valores de 990, 2,474, 4,948, 9,896 y 14,843 toneladas de CO₂eq, mientras que el potencial de reducción de emisiones se estimó en 752, 1,908, 3,835, 7,689 y 11,543 toneladas de CO₂eq (una reducción del 77%) para los diferentes tamaños de establos lecheros que van desde 200 hasta 3000 vacas lecheras. Estos resultados contrastan con los informados por Solano (2019) en Venezuela y Sanaye & Yazdani (2022) en Irán, quienes obtuvieron porcentajes de reducción de emisiones del 86.8% y 64%, respectivamente, para sistemas similares.

La rentabilidad de los sistemas de generación de biogás, como los biodigestores y motogeneradores, ha sido respaldada por investigaciones previas (FIRCO, 2007; Escalera et al., 2014; Venegas et al., 2019). No obstante, existen escasos estudios sobre la viabilidad económica de estos sistemas en establos lecheros. Casas et al. (2009) llevaron a cabo un análisis para varios tamaños de establos lecheros, concluyendo que solo el establo de 200 vacas no resultaba económicamente viable.

La inversión en proyectos de energía limpia, como los sistemas biodigestor-motogenerador, es crucial en la actualidad. Los análisis de rentabilidad proporcionan información valiosa que puede guiar decisiones de inversión en proyectos que promueven la sostenibilidad y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (Cuadro 3). Según Velásquez, Venturini, Silva, Almazan, y Calle, (2019), las plantas de biogás en el sector agrícola son atractivas en varios países debido a la posibilidad de generar ingresos adicionales mediante la venta de energía eléctrica a la red de distribución, aunque aún no se han definido completamente las condiciones específicas para su rentabilidad.

Cuadro 3.

Rentabilidad del sistema biodigestor-motogenerador para cinco tamaños de establos lecheros para la actividad lechera en México

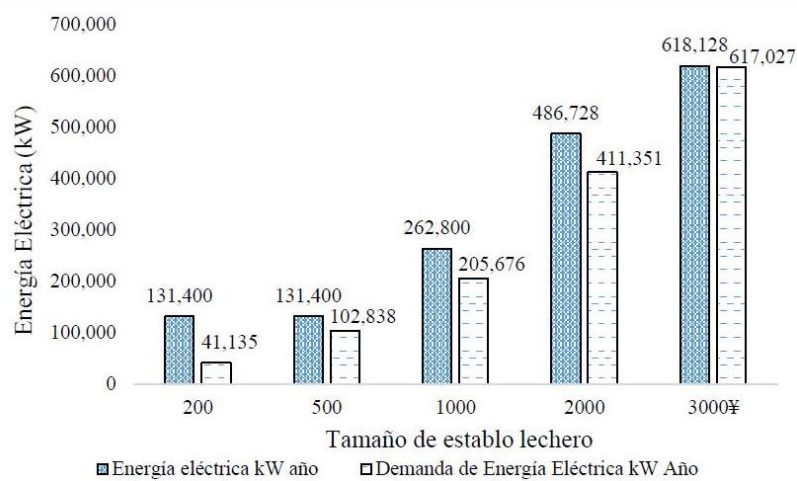
Tamaño (Cabezas)	Costo biodigestor-motogenerador (\$)	Biogás (m ³ año ⁻¹)	Demanda de biogás (m ³ año ⁻¹)	Período de Recuperación de la Inversión (Año)	VAN	TIR	B/C
200	1,608,229	135,083	120,450	6	49,929	11.80	1.03
500	1,887,290	337,708	120,450	6	146,178	12.81	1.06
1000	2,904,627	675,417	339,450	4	1,545,247	22.71	1.44
2000	3,942,739	1,350,833	492,750	3	5,044,584	37.16	2.09
3000	4,203,811	2,026,250	613,200	3	7,236,691	40.89	2.24

Fuente: elaboración propia. Nota: para el tamaño 200 y 500 vacas se evaluó un motogenerador de 30 kWh, para el tamaño de 1000 uno de 60 kWh, para el tamaño de 2000 uno de 127 kWh y para el tamaño de 3000 vacas se contemplaron dos motogeneradores (30 y 127 kWh).

Según Venegas et al. (2017), las unidades de producción que utilizan motogeneradores alimentados con biogás tienen el potencial de cubrir el 100% de sus necesidades de energía eléctrica cuando operan al 100% de su capacidad. La



Gráfica 1 muestra la demanda de energía eléctrica para cada tamaño de establo lechero propuesto, y se observa que se podría satisfacer el 100% de esa demanda, lo que resultaría en un ahorro del 100% en los costos de electricidad. Además, se generaría un excedente de energía que podría ser interconectado a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).



Gráfica 1. Potencial de generación de energía eléctrica y consumo promedio en cinco tamaños propuestos de establos lecheros en México (kW).

Fuente: elaboración propia. Nota: Para el establo de 3000 vacas lecheras se contemplan dos motogeneradores (30 y 127 kWh).

Los resultados son consistentes con lo informado por Solano (2019), quien evaluó establos lecheros de seis tamaños diferentes, donde el tamaño más pequeño (50 vacas) podría cubrir el 98% de su demanda de energía eléctrica, mientras que los otros tamaños presentaban excedentes que oscilaban entre el 12% y el 29%. Esta capacidad de autogeneración de electricidad y la posibilidad de exportar excedentes a la red eléctrica representan ventajas significativas en términos de reducción de costos operativos y contribución a la matriz energética sostenible, lo que hace que los sistemas biodigestor-motogenerador sean una opción atractiva para la industria lechera en México.

Los cinco sistemas propuestos en esta investigación demuestran ser rentables, ya que presentan indicadores de rentabilidad positivos. Estos indicadores incluyen un Valor Actual Neto (VAN) mayor a 0, una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior

a la tasa de actualización del 11.06%, y una Relación Beneficio-Costo (B/C) mayor a 1. Además, se observa que a medida que el tamaño del establo lechero aumenta, la rentabilidad también aumenta. La inversión se recupera en un período más corto a medida que se incrementa el tamaño del sistema, por ejemplo, en el tercer año para establos de 2000 y 3000 vacas. Estos resultados son coherentes con lo informado por Vera-Romero et al. (2017), quienes concluyeron que la inversión en biodigestores y motogeneradores en Jalisco se recupera en el tercer año. Pero difieren con Vilas et al. (2023), quienes indican que la inversión de sistema biodigestor-motogenerador en Brasil se recupera en 7.9 años.

Es necesario destacar que los resultados difieren de otros estudios que evalúan sistemas similares en diferentes contextos. Por ejemplo, Venegas et al. (2019), quienes evaluaron un sistema biodigestor-motogenerador para una granja de 1000 cerdos (equivalente a 200 vacas lecheras), obtuvieron una TIR del 17% y un VAN positivo, en cuanto a Pinto et al. (2023) evaluaron sistemas biodigestor-motogenerador en Brasil, en codigestión de estiércol bovino y cerdo, contemplaron 7 tamaños, el equivalente entre 1760 y 2000 vacas, a partir de quinto tamaño el sistema es rentable, es decir, a partir al equivalente a 1880 vacas lecheras. Estos resultados demuestran que la rentabilidad de estos sistemas puede variar según las condiciones específicas de cada proyecto y ubicación.

De esta manera, los sistemas de generación de biogás, como los biodigestores tipo laguna con motogeneradores, ofrecen oportunidades de inversión rentables en el sector lechero de México, especialmente para establos de mayor tamaño. Sin embargo, es importante realizar un análisis detallado y considerar las condiciones locales para evaluar la viabilidad económica de cada proyecto de manera individual.

Conclusiones

La actividad lechera en México desempeña un papel crucial en la economía nacional y la adopción de biodigestores representa una oportunidad significativa para convertir los desechos generados en establos lecheros en una fuente de energía limpia y sostenible. El potencial de generación de biogás en el país es impresionante, con la capacidad de producir 1,649.5 millones de metros cúbicos de biogás al año. Este

biogás se traduce en un potencial de generación de energía eléctrica de 2,327.3 GW anuales, suficiente para satisfacer las necesidades de más de un millón de personas.

Los estados de Jalisco, Chihuahua, Durango y Coahuila emergen como líderes en la producción de leche y, por ende, en la generación de biogás, lo que subraya la importancia de la ganadería lechera en estos lugares. Los estados señalados arriba, representan casi la mitad del potencial total de México para la producción de biogás y energía eléctrica a partir de residuos de establos lecheros.

La implementación de sistemas de biodigestores tipo laguna con motogeneradores se muestra como una inversión rentable para los productores de leche. La recuperación de la inversión puede lograrse en un período relativamente corto, oscilando entre el tercer y sexto año, dependiendo del tamaño del establo. Esto indica que, además de contribuir a la sostenibilidad ambiental y a la reducción de emisiones de GEI, estos sistemas también pueden mejorar la productividad y la rentabilidad de los establos lecheros en México.

La adopción de energía renovable, como la generación de biogás a partir de residuos de establos lecheros, ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales a las unidades de producción. Al mejorar la competitividad y promover prácticas más sostenibles, estos sistemas contribuyen al desarrollo sostenible de la industria lechera en México y refuerzan el compromiso con la transición hacia fuentes de energía más limpias y amigables con el medio ambiente.

Referencias

- Almomani, F. y Bhosale, R. R. (2021). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. *Chemosphere*, 255, 1-13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>
- Alvarado, J. C., De Oliveira, O. R., De Oliveira, J., Damasceno, M. E. y Alvez, A. C. (2020). Uso do biodigestor na cuinocultura: uma alternativa à sustentabilidade ambiental na Região do Maciço de Baturité, Ceará. R. gest. sust. ambient., *Florianópolis*, 9(2), 783-818, doi: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020783-818>
- Baca, U. G. (2013). *Evaluación de proyectos*. 7ª Ed., México: McGraw-Hill.

- Barrena, M. Á., Salazar, S. P., Gosgot, Á. W., Ordinola, C. M. y Huanes, M. M. (2019). Diseño del biodigestor tipo laguna cubierta para el establo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Amazonas. *Rev. de investig. agroproducción sustentable*, 3(2), 63-70, doi: <https://doi.org/10.25127/aps.20192.491>
- Benali, M., Hamad, T. y Hamad, Y. (2019). Experimental Study of Biogas Production from Cow Dung as an Alternative for Fossil Fuels. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 9, 91-97, doi: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2019.93007>
- Benavides, H. O. y León, G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Bogotá, Colombia: IDEAM.
- Carmona, J. C., Bolívar, D. M. y Giraldo, L. A. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 49-63. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295022952006>
- Casas, M. A., Rivas, B. A., Soto, Z. M., Segovia, L. A., Morales, H. A., Cuevas, M. I. y Keissling, C. M. (2009). Estudio de factibilidad para la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de Delicias, Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 24(XIII), 745-756.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA, 2019). *Situación de la Ganadería Lechera en el Sureste de México*. Ciudad de México: Cámara de Diputados LXIV Legislatura.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2019). *Evaluación e implementación de proyectos piloto de biodigestores en El Salvador*. Ciudad de México: ONU. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/806f1317-e56e-4f74-af4e-70fe27704ec6/content>
- Chen, Y. R. (1983). Kinetic Analysis of Anaerobic Digestion of Pig Manure and its Design Implications. *Journal of Agricultural Wastes*, 8(2), 65-81, doi: [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90105-1](https://doi.org/10.1016/0141-4607(83)90105-1)
- Escalera, M. E., Gallegos, F. G. y Leal, V. J. C. (2014). Clean energy a cdm project option. *European Scientific Journal*, 10(15), 326-338, doi: <https://doi.org/10.19044/esj.2014.v10n15p%25p>
- Espinoza-Arellano, J. J., Fabela-Hernández, A. M., López-Chavarría, S. y Martínez-Gómez, F. (2019). Impacto de las importaciones de leche en polvo y derivados lácteos en el precio al productor de leche de bovino en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 16(1), 123-139, doi: <https://doi.org/10.22231/asyd.v1i1.985>
- Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO, 2007). Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. *Revista Claridades agropecuarias*, 168, 3-40.

- FIRCO (2011). *Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México*. México: Sagarpa.
- Food and Agriculture Organization (FAO, 2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires: FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/publications/card/en/c/CA5082ES/>
- FAO (2022). *World Food and Agriculture-Statistical Yearbook 2022*. Rome: FAO, doi: <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- FAO (2023). *Producción lechera. 11 de febrero de 2023*. Recuperado de <https://www.fao.org/dairy-productionproducts/production/es/>
- García, B. A. y Masera, C. O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México*. México: Imagia Comunicación. Recuperado de <https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/6d95688b94fb96e56675c3ff6387225f-2.pdf>
- Gasque, G. R. y Blanco, M. A. (2001). *Zootecnia en bovinos productores de leche*. México (DF): UNAM.
- Gutiérrez, J. P. (2018). *Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030*. Morelia, Michoacán: Red Mexicana de Bioenergía A. C. Recuperado de <https://rembio.org.mx/wpcontent/uploads/2023/05/Situacion-actual-y-escenarios-para-el-desarrollo-del-biogas-en-Mexico.pdf>
- Hashimoto, A. G., Chen, Y. R. y Varel, V. H. (1981). *Theoretical aspects of methane production: state of the art in Livestock Wastes: A Renewable Resource*. Michigan, USA: ASAE.
- Hashimoto, A. G. (1984). Methane from swine manure: Effect of temperature and influent substrate concentration on kinetic parameter (K). *Journal of Agricultural Wastes*, 9(4), 299-308, [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(84\)90088X](https://doi.org/10.1016/0141-4607(84)90088X)
- Hernandez-De Lira, O., Huber, D. H., Espinosa-Solares, T. y Balagurusamy, N. (2015). Methane emission and bioenergy potential from livestock manures in Mexico. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(5), 1-10, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4934564>
- Hernández-Anaya, A., Ruesga-Gutiérrez, E., Olmos-Cornejo, J. E. y Cortés-López, A. I. (2018). Impacto del uso de paneles solares por productores lecheros de los Altos de Jalisco. En R. Jarquín-Gálvez y A. Huerta-De la Peña (Eds.), *Agricultura sostenible como base para los agronegocios* (pp. 966-971). San Luis Potosí, S. L. P.: Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible A. C.
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP, 2017). *Reporte de inteligencia tecnológica: Biocombustibles gaseosos*. México: SENER. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329908/Reporte_Inteligencia_Tecnologica_BIOGAS_Final.pdf

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp.11-59). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lagrange, B. (1979). *Biomethane 2: Principes-techniques utilization*. La Calade, France: EDISUD.
- Loera, J. y Banda, J. (2017). Industria lechera en México: parámetros de la producción de leche y abasto del mercado interno. *Rev. Investig. Altoandin*, 19(4), 419-426, doi: <https://doi.org/10.18271/ria.2017.317>
- Mantilla, J. M., Duque, C. A. y Galeano, C. H. (2007). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 133-142. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327316>
- Martí, H. J., Pino, M. A. y Viquez, J. A. (2017). *Biogás en el sector lechero en Chile* (1a ed.). Chile: ONUDI-GEF.
- Martínez-García, R. A., Espinosa-Solares, T., Flores-Velázquez, J., Rojano-Aguilar, A., Reséndiz-Cantera, O. y Arzeta-Ríos, A. J. (2020). Mejoramiento del desempeño hidrodinámico de un digestor anaeróbico de laguna cubierta mediante CFD. *Biotecnia*, XXII(1), 56-66. Recuperado de <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/1125/363>
- Molina, M. V. M., Molina, V. P., Espinoza, J. de J., Contreras, M. J. G. y López, V. A. (2020). Viabilidad técnica y económica del uso de calentador comercial de agua a base de biogás en establos lecheros. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 391-403, doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2078>
- Ngo, T., Ball, A. S. y Shahsavari, E. (2021). The Current Status, Potential Benefits and Future Prospects of the Australian Biogas Sector. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 11, 14-32, doi: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2021.111002>
- Olivo, M. de L. y Soto-Olivo, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 14(57), 221-230.
- Pinto, J. A., Barros, R. M., Silva, I. F., Tiago, G. L., De Oliveira, M. C., Vilas, T. F. y De Cássia, A. M. (2023). Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. *Cleaner Waste Systems*, 5(2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>

- Pizarro, C., Mulbry, W., Bliersch, D. y Kangas, P. (2006). An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. *Journal of ecological engineering*, 26, 321-327, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.12.009>
- Roslee, J. H., Yasumura, A. T., Silva, I. F., De Souza, R. N., Gbedjinou, M. J., Nago, V. G., Tiago, G. L. y Barros, R. M. (2021). Assessment of electricity generation from biogas in Benin from energy and economic viability perspectives. *Renewable Energy*, 163, 613-624, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.014>
- Sanaye, S. y Yazdani, M. (2022). Energy, exergy, economic and environmental analysis of a running integrated anaerobic digester-combined heat and power system in a municipal wastewater treatment plant. *Energy Reports*, 8, 9724-9741, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.155>
- Saynes, S. V., Etchevers, J. D., Paz, P. F. y Alvarado, C. L. O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 83-96. Recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00083.pdf>
- Scarlat, N., Dallemand, J. F. y Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129(2018), 457-472, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader, 2019). *Viable, elevar la producción lechera y alcanzar la autosuficiencia, coinciden productores y gobierno. 25 de marzo de 2023*. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/viable-elevar-la-produccion-lechera-y-alcanzar-la-autosuficiencia-coinciden-productores-y-gobierno-216512>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa, 2018). *Crece la producción de leche en México. 11 de febrero de 2023*. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/colima/articulos/crece-la-produccion-de-leche-en-mexicosagarpa158944?idiom=es>
- Secretaría de Economía (SE, 2012). *Análisis del Sector Lácteo en México*. México: SE.
- Secretaría de Energía (Sener, 2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. México: Sener.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Semarnat e INECC, 2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Distrito Federal, México: Semarnat e INECC.
- Semarnat e INECC. (2022). *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019*. Ciudad de México: Semarnat e INECC. Recuperado de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI_Mexico_1990_2019.pdf

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023). *Anuario Estadístico de la Producción Ganadera. 13 de febrero de 2023*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>
- Solano, J. A. (2019). Pre-factibilidad de generación de energía en zonas ganaderas mediante la Biodigestión de residuos agropecuarios como apoyo a la transición energética en Venezuela. *Rev. Tekhné*, 22(3), 68-78. Recuperado de <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/4091>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 2013). *ACM0010 Large-scale Consolidated Methodology: GHG emission reductions from manure management systems V. 8.0*. (5th ed.). Bonn, Germany: UNFCCC.
- United States Agency for International Development) and International Renewable Resources Institute of México (USAID and IRRI, 2015). *Anaerobic Biodigester Technology in Methane Capture and Manure Management in Mexico: The History and Current Situation*. México: USAID and IRRI. Recuperado de https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00MG6H.pdf
- United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2006). *AgSTAR Digest*. Washington D.C.: EPA.
- U. S. Energy Information Administration (EIA, 2023). *World Energy Projection System 2021. 9 de abril de 2023*. Recuperado de https://www.eia.gov/outlooks/ieo/tables_side_xls.php
- United States National Oceanic y Atmospheric Administration (USNOAA, 2023). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide. 15 de marzo de 2023*. Recuperado de https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_n2o/
- Velásquez-Piñas, J. A., Calle-Roalcaba, O. D., Miramontes-Martínez, L. R. y Alonso, L. A. (2023). Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio. *rev. ion*. 36(1), 29-47. doi: <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023003>
- Velásquez, J. A., Venturini, O. J., Silva, E. E., Almazan, O. O. y Calle, O. D. (2019). An economic holistic feasibility assessment of centralized and decentralized biogas plants with mono-digestion and co-digestion systems. *Renewable Energy*, 139, 40-51, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.053>
- Venegas, J. A., Espejel, G. A., Pérez, F. A., Castellanos, J. A. y Sedano, C. G. (2017). Potencial de energía eléctrica y factibilidad financiera para biodigestor-motogenerador en granjas porcinas de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), 735-740, doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.47>
- Venegas, J. A., Aryal, D. R. y Pinto, R. R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis Económico*, XXXIV(85), 169-187, doi: <https://10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2019v34n85/Venegas>

- Vera, M. I. (2011). *Desarrollo metodológico para el análisis de la viabilidad de un proyecto de microgeneración*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Vera-Romero, I., Martínez-Reyes, J., Estrada-Jaramillo, M. y Ortiz-Soriano, A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, XV(3), 429-436, doi: [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(14\)70352-X](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(14)70352-X)
- Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., Martínez-Reyes, J. y Ortiz-Soriano, A. (2015). Potencial de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI(3), 471-478, doi: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012>
- Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., González-Vera, C., Tejeda-Jiménez, M., López-Andrade, X. y Ortiz-Soriano, A. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII(3), 307- 320, doi: <https://10.22201/ifi.25940732e.2017.18n3.027>
- Vilas, T. F., Barros, R. M., Pinto, J. A., Silva, I. F., Silva, E. E., Vieira, A. R., Tiago, G. L., Arruda, A. K. y De Oliveira, M. G. (2023). Energy potential from the generation of biogas from anaerobic digestion of olive oil extraction wastes in Brazil. *Cleaner Waste Systems*, 4(2023), 100083. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100083>
- Williams, D., Buckenham, N. R., Black, N., Dowd, R., Andrew, C. y Swartz, J. (2020). Construction and Operation of the ABEC #3 Covered Lagoon Digester and Electrical Generation System. Visalia, California: California Energy Commission.