

Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle

Vol. 15, No. 60, Julio-Diciembre, 2023: 107-122

DOI: <http://doi.org/10.26457/recein.v15i60.3016>

Estimación de la energía eléctrica generada en establos lecheros mediante biodigestores y paneles solares

Estimation of the electric energy generated in dairy farms by bio- digesters and solar panels

Juan Antonio Rendón Huerta
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)

Héctor Martín Durán García¹
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)

Juan Carlos García López
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)

Juan Manuel Pinos Rodríguez
Universidad Veracruzana (México)

Recibido: 08 de julio de 2021

Aceptado: 12 de enero de 2023

Publicado: 21 de agosto de 2023

¹ Email: hduran@uaslp.mx



Resumen

El uso de desperdicios generados en los sistemas de producción lechera y el aprovechamiento de la energía irradiada por el sol, pueden ser una alternativa para incrementar la fluidez de activos y reducir la huella de carbono en dichos sistemas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue estimar la energía eléctrica generada combinando tecnología de paneles solares y digestores anaerobios en sistemas intensivos de producción de leche bovina en la región centro de México. La generación de electricidad por metano en un establo con 914 vacas en producción y paneles solares con interconexión a la red, fue de 96579.6 kWh al bimestre. Esto representa una disminución del consumo directo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 39.3 % y de 63 % en la huella ecológica. La amortización estimada osciló entre (US\$ 2642 y US\$ 10316 dólares americanos) al bimestre. La inversión se recupera en un plazo de 10 años o de 7.5 con la ayuda de bonos de carbono.

Palabras clave: Establos lecheros, fermentadores, energías limpias, impacto ambiental, paneles solares.

Abstract

The use of wastes generated in the dairy production systems such as the use or irradiated energy by the sun can be an alternative to increase the active flows and reduce the carbon footprint in these systems. Therefore, the objective of this study was to estimate the electric energy generated and combined with solar panels technology and anaerobic digestors in intensive dairy production systems in the central region of Mexico. The estimated electricity generated by methane burning and solar panels in a farm with 914 cows was 96579.6 kWh bimonthly. This represents a decrease of 39.3% in the direct composition of the Comisión Federal de Electricidad (CFE) and 63% of the ecological footprint. The estimated amortization ranged between (US\$ 2642 and US\$ 10316) in the two – month period. The investment is recovered within 10 years or 7.5 years whit the help of carbon credits.

Keywords: Dairy farms, fermenters, clean energies, environmental impact, solar panels.

Introducción

Los establos lecheros generan una gran cantidad de desechos orgánicos (estiércol y orina) proveniente de vacas en confinamiento para la producción de leche (Dungan, 2010), si el estiércol es tratado adecuadamente en fermentadores anaerobios, puede ser convertido en biogás y generar electricidad por la quema de dicho combustible en generadores eléctricos (Lansing et al., 2010). La fermentación anaerobia de estiércol es un proceso bioquímico, que termina en un gas inflamable, principalmente metano (CH₄) (Sanders et al., 2010), además de otros gases (Cuadro 1).

Cuadro 1

Composición de gases por la fermentación del estiércol bovino

Componente	Concentración
Metano (CH ₄)	55-65 %(vol)
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-45 %(vol)
Vapor de agua (H ₂ O)	2-7 %(vol)
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	20-20000 ppm
Nitrógeno (N ₂)	< 2 %(vol)
Oxígeno (O ₂)	< 2 %(vol)
Hidrógeno (H ₂)	< 1 %(vol)

Nota. Abbasi et al. (2012)

Una molécula de metano es un gas de efecto invernadero (GEI) con una capacidad de absorber calor 25 veces mayor que una molécula de CO₂ (IPPC, 2007). Dependencias del gobierno mexicano, han mostrado interés por contribuir a reducir emisiones de GEI generados en establos lecheros mediante la adopción de tecnología para producir electricidad (FIRCO-SAGARPA, 2013). Según el Fideicomiso de Riesgo Compartido de la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (FIRCO-SAGARPA, 2013) para el año 2009, en

México existían 142 sistemas de fermentación de estiércol, de los cuales 54 están localizados en establos lecheros y el resto en granjas porcinas. Al igual que la energía obtenida del biogás, la energía solar también se puede convertir en energía eléctrica por medio de paneles solares, la inclusión de paneles solares para generar electricidad en establos no es muy común, sin embargo, en países como China, los establos están utilizando este tipo de tecnología para disminuir el costo de electricidad debido al bombeo de agua para el riego de alfalfa, que es uno de los ingredientes de mayor cantidad en la dieta y que encarece la producción de este cultivo debido al número de riegos, sin embargo la alfalfa es muy usada porque favorece la productividad de leche. Finalmente, los autores concluyen que la inclusión de sistemas con paneles solares reduce el consumo de electricidad hasta en 0.25 kWh/kg de leche, así como las emisiones de CO₂ de hasta 1.4 kg por cada kg de leche (Zhang et al, 2017). Estas tecnologías también llamadas limpias, requieren de inversiones de capital con recuperación a largo plazo. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue estimar la energía eléctrica generada combinando tecnología de paneles solares y digestores anaerobios en sistemas intensivos de producción de leche bovina en la región centro de México.

1. Materiales y métodos

Para recabar información que permita estimar la energía eléctrica generada combinando tecnología de paneles solares y digestores anaerobios en sistemas intensivos de producción de leche bovina, se visitaron ocho ranchos lecheros en la región centro de México en los estados de Guanajuato, Querétaro y Aguascalientes. La finalidad fue analizar el tamaño del hato y su composición por estado productivo, así como el volumen y manejo del estiércol generado, adicionalmente, cuantificar el consumo de energía eléctrica para la operación del establo (Cuadro 2).

Cuadro 2

Población promedio, generación de estiércol y producción de metano provenientes de vacas lecheras distribuidas por categoría de producción promedio de ocho establos

Población por categoría	Número de animales	de Generación de estiércol, kg d⁻¹	de Producción máxima de metano en estiércol, kg animal⁻¹ d⁻¹
Vacas lactantes	914 (±223)	68	0.087
Vacas secas	85 (±51)	38	0.067
Toros	72 (±28)	38	0.067
Vaquillas	40 (±19)	22	0.051
Becerras	520 (±310)	8.5	0

Nota. Estimado con la metodología del IPCC (2006) nivel II

Los ranchos se seleccionaron de acuerdo con los requisitos establecidos por FIRCO para el otorgamiento de subsidios (establos con más de 300 vacas). La producción de metano por cantidad de estiércol para las distintas categorías de vacas, se calculó con la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático Nivel II (IPCC, 2006), ecuación 1.

$$FE = (SV_j) \cdot (B_0(j) \times 0,67 \times (MCF_{S,j} \times MSS_j)) \quad (1)$$

donde FE = factor de emisión diaria de metano CH₄ para la población de ganado, kg CH₄ animal⁻¹ d⁻¹; SV = sólidos volátiles excretados por día, kg MS vaca⁻¹ d⁻¹; B₀ = capacidad máxima de producción de metano de estiércol producido, m³ CH₄ kg⁻¹ SV excretados; 0.67 factor de conversión de m³ de CH₄ a kg de CH₄; MCF = factor de conversión de metano para cada sistema de gestión del estiércol por región climática, %; MS = fracción del estiércol del ganado manejado usando el sistema de gestión de desechos en la región climática, sin dimensiones. Los valores de SV, B₀ y MCF para vacas lecheras se tomaron de la guía del IPCC (2006) y de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrónomos (ASAE, 2005).

Calculada la máxima producción de metano en un fermentador tipo laguna (Figura 1), se estimó la energía eléctrica obtenida con un generador de referencia de la marca Econogas (www.mopesa.com.mx) (a biogás de 60 kW, factor de potencia 0.8 y desplazamiento cúbico 5.8 L); las emisiones de CO₂ se estimaron con la fórmula química de combustión metano (Brown *et al.*, 2003), (Ecuación 2).

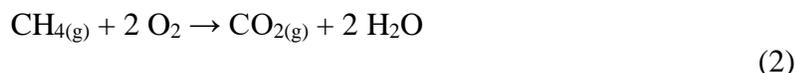
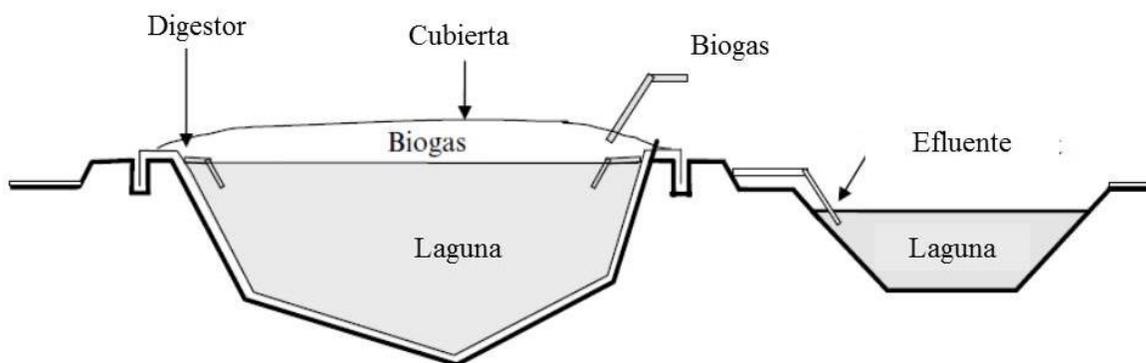


Figura 1

Esquema gráfico de un digestor tipo laguna (AgSTAR 2011)



En la estimación de la energía eléctrica generada por medio de paneles solares, se tomaron datos tecnológicos de ERDM Solar (<http://www.erdmsolar.com>) con interconexión a la red, se seleccionó el kit de 60 paneles solares de 1980 mm x 1000 mm (118.8 m²) de 370 W/h cada uno. El potencial máximo de producción de electricidad se estimó con base a las horas de insolación promedio al día en la región de estudio (NMSU, 1999). El análisis de rentabilidad incluyó el análisis de costos para los dos tipos de energías alternas y los beneficios asociados con la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos y los paneles solares en establos lecheros con conexión a la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con un precio fijo de US\$ 0.18 por kWh consumido para riego agrícola en baja tensión (RABT) en la zona centro de

México (CFE, 2018). En el estudio económico del proyecto se tomó en cuenta la demanda de energía al bimestre (para la sala de ordeña, iluminación, bombeo de agua), e inversiones en activos fijos. Además, y como dato importante, se registró y cuantificó la diferencia en el consumo de electricidad de la red de la CFE con el uso de biogás y paneles solares.

2. Resultados y discusión

Los apoyos para la adquisición de fermentadores y generadores se otorgan a aquellos productores que cuenten con más de 300 vacas (productores de leche), cuyo manejo del estiércol facilite la producción de biogás y que la instalación del fermentador no afecte la bioseguridad del establo. Para apoyar la adquisición de un motogenerador, la unidad productora debe tener una demanda mínima mensual superior a 10000 kWh. Los establos de referencia en este estudio tienen un promedio de 914 vacas en producción (Cuadro 2) con un consumo promedio bimestral de 189,106 kWh (que cubre la extracción de agua de pozo, la ordeña mecánica y la iluminación). La inversión de parte del productor para construir el fermentador tipo laguna y la compra de un generador de electricidad es superior a US\$ 150,107.4, además del apoyo de la dependencia del gobierno US\$ 106,540.8 (Cuadro 3). Hay apoyos de SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) a través de FIRCO (Fideicomiso de Riesgo Compartido) de hasta US\$ 76,923.1 para la adquisición de fermentadores (el único compromiso del beneficiario es lograr un manejo sustentable de los desechos orgánicos). Además de ofrecen apoyos máximos por US\$ 19,230.7 para comprar generadores eléctricos (mototransformador) con capacidad de generar 60 kWh y de hasta el 50% en la adquisición de paneles solares, pero que no rebasen US\$ 307,692.3 (ASERCA, 2008). En el costo del kit de paneles solares se incluye la instalación y el mantenimiento por los primeros tres años.

Cuadro 3

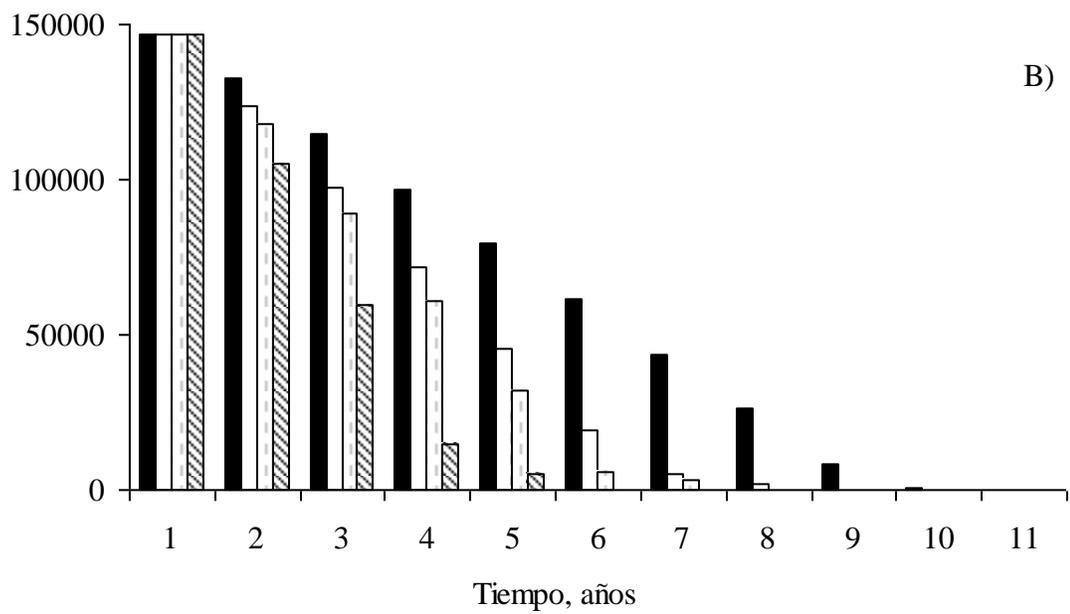
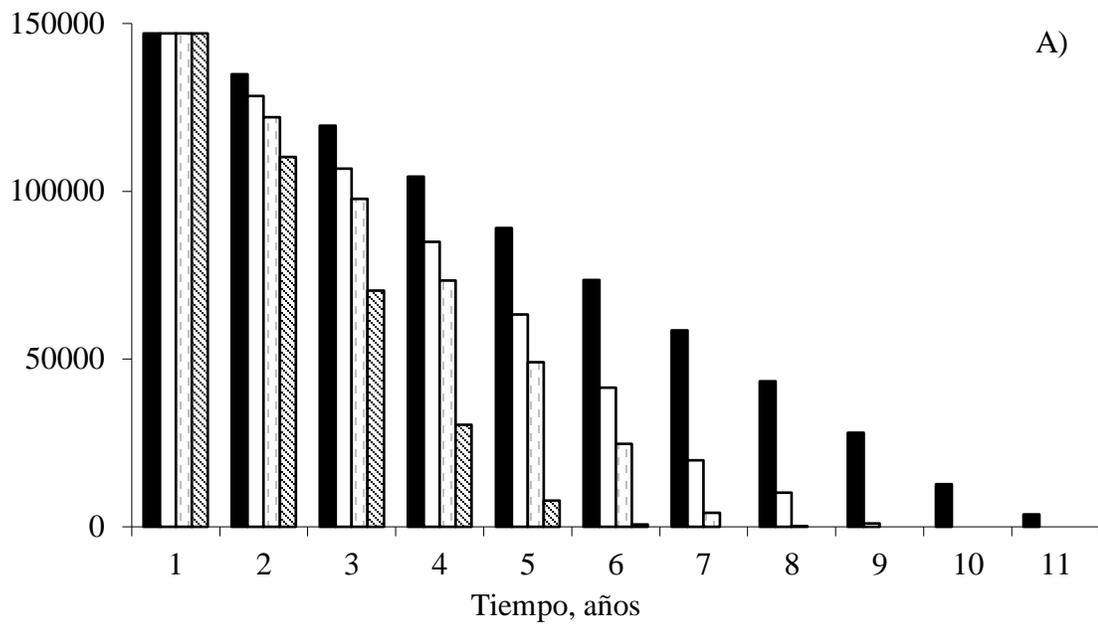
Estimación de la inversión inicial y subsidios federales para la adquisición de infraestructura en la generación de energía eléctrica

Artículo	Inversión, US\$	Apoyo económico máximo de Firco, US\$
Biofermentador tipo laguna e instalación	175,874.4	76,923.1
Generador eléctrico, 60 kWh e instalación	59,999.8	19,230.7
Paneles fotovoltaicos, 10.34 kW	20,774	10,387
Total	256,648.2	106,540.8

Es claro que para que este tipo de tecnologías funcionen, se requiere de la cooperación de programas de gobierno y otras organizaciones con la finalidad de obtener beneficios ambientales y económicos (Wang et al., 2011). La rentabilidad por la adquisición de energías alternas también denominados Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) se muestra en la Figura 2, en ella se observa que la inversión inicial es recuperable en un plazo aproximado de 10 años. La amortización bimestral calculada oscila entre US\$ 2,642 y US \$ 10,316. La reducción de emisiones de GEI en los establos se puede vender en otras regiones o países que emiten cantidades superiores de GEI a las establecidas por el protocolo de Kioto, a través de los certificados de reducción de emisiones (CERs) o bonos de carbono que promueve el Banco Mundial (ECOFYS, 2014), los cuales, en California, EUA, se cotizan en US\$ 10 t⁻¹ CO₂ equivalente. Y, de acuerdo con nuestros cálculos, con el uso de energías alternas las emisiones de GEI se reducirán entre 81 y 91.2 t⁻¹ CO₂ equivalente/bimestre, lo cual permite incrementar los ingresos al establo entre US\$ 414 y US\$ 912, aunado al ahorro de consumo de electricidad por la generación de la misma y canalización a la red de la CFE; el tiempo de amortización estimado es de 7.5 años.

Figura 2

Tiempo de recuperación de la inversión anual por la adquisición del fermentador-motor-generador y los paneles solares para generar electricidad en establos lecheros



Nota. 300-500 vacas (■), 600-750 vacas (□), 800-1000 vacas (▣), y 1150-1600 vacas (▤).

A) tiempo de recuperación de la inversión con la electricidad generada únicamente y, B) tiempo de recuperación de la inversión con la electricidad generada y la venta de certificados de reducción de emisiones, US \$10 t⁻¹ CO₂eq.

En el Cuadro 4, se ejemplifica el cálculo de los valores de generación de electricidad con biodigestor y paneles solares en un establo cercano a la ciudad de Querétaro, donde la insolación u horas solares al día necesarias para generar electricidad en la región va desde 4.4 kWh m² d⁻¹ para el mes de diciembre a 6.9 kWh m² d⁻¹ para el mes de mayo. Al combinar las dos formas de generación de energía eléctrica, se obtienen 579,477.46 kWh anuales, dato relativamente distante a lo estimado en otros estudios (Casas-Prieto et al., 2009 y Rivas-Lucero et al., 2012), pues ellos calcularon un máximo de 883,572 y 874,530 kWh al año, respectivamente, para un establo con 1000 vacas. Estas diferencias posiblemente se deben al número de vacas y a que ellos estimaron la producción de metano con la guía del IPCC (2006) nivel I, la cual sólo toma en consideración el número de vacas y un factor de emisión por tipo de clima en la región, sin describir el tipo de almacenamiento del estiércol. Es necesario mencionar que los valores mostrados en el Cuadro 4 son únicamente una estimación y que muy probablemente en la práctica la generación eléctrica será menor.

Cuadro 4

Ejemplificación del cálculo de generación de energía con un biodigestor y un kit de 60 paneles solares; en el establo se cuenta con 914 vacas en producción

Mes	Consumo eléctrico del pozo para riego, kW	Consumo eléctrico en la sala de ordeño, kW	Demanda total de energía, kW	Insolación global media, kWh/m ² d ⁻¹	Generación de electricidad en los paneles solares, kW	Generación de electricidad en el biodigestor, kW	Suma de generación eléctrica, paneles – biodigestor, kW	Consumo aparente de electricidad de la red, kW
Enero	31,126	17,544	48,670	5.0	18,414	29,528.14	47,942.14	729
Febrero	33,453	17,471	50,924	5.7	18,960	26,670.58	45,631.58	5,293
Marzo	136,131	17,542	153,673	6.4	22,810	29,528.14	52,338.14	100,575
Abril	136,087	17,356	153,443	6.8	24,235	28,575.62	52,810.62	100,632
Mayo	136,126	16,544	152,670	6.9	25,411	29,528.14	54,939.14	97,731
Junio	136,022	3,252	139,274	6.4	22,810	21,135.1	43,945.1	95,329
Julio	136,144	3,642	139,786	6.4	22,810	21,839.61	44,649.61	94,376
Agosto	135,389	3,855	139,244	6.4	22,810	21,839.61	44,649.61	94,595
Sept.	134,401	171,679	306,080	6.3	22,453	28,575.62	51,028.62	255,051
Oct.	136,126	173,829	309,955	5.4	19,887	29,528.14	49,415.14	260,540
Nov.	4,289	175,182	179,471	5.0	17,820	28,575.62	46,395.62	133,075
Dic.	5,837	175,673	181,510	4.4	16,204	29,528.14	45,732.14	153,778

El total de CO₂ equivalente estimado en el establo sin el uso de tecnologías para la generación de electricidad fue de 3,733 kg d⁻¹ CO₂ equivalente (de los cuales el 62%, 17.7% y 20.3% corresponden al consumo de electricidad, emisiones de CH₄ y N₂O, respectivamente). Con el uso de energías alternas el total de emisiones estimadas de CO₂ equivalente fue 1,448.2 kg d⁻¹, de los cuales 93.6% y 6.34% corresponden al uso de electricidad y a la quema de CH₄ en el mototransformador.

Otros estudios señalan que la utilización de cladodios de nopal podría incrementar hasta 70% la generación de biogás en los fermentadores cuando se mezcla en proporción 3:1 de nopal y estiércol de bovino (Méndez-Gallegos et al., 2010). La digestión anaerobia prolongada del estiércol en lagunas anaerobias disminuye la generación de olores hasta en 91%, debido a que disminuye la DQO (demanda química de oxígeno) (Van Horn et al., 1994), sobre todo en lugares de clima caliente. La aplicación del efluente del fermentador al suelo en campos de cultivo, incrementa el contenido de materia orgánica, ayudando a la formación de agregados en el suelo y mejorando la infiltración del agua; dicho efluente no contiene microorganismos patógenos (Massé et al., 2010). La generación y quema de metano conlleva a otro tipo de problemas ambientales, como las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) debido a que el biogás contiene amonio (NH_3) que al ser quemado produce NO_x (Burch and Southward, 2001). Para esto McCarty (2000) propone el uso de materiales catalizadores para la combustión de CH_4 , y entre los mejores se encuentran metales nobles como el platino y el óxido de paladio, pero es muy posible que, de utilizarlos, se incremente la inversión inicial. El uso de distintas fuentes de energía puede ser una opción para mitigar gases de efecto invernadero por el aprovechamiento de materia orgánica en descomposición y de la luz solar para generar electricidad en establos lecheros estabulados, que, amortizada la inversión, disminuyen los gastos de operación tanto en el consumo de electricidad como por un aprovechamiento integral del estiércol (fertilizante de mejor calidad, aplicado en áreas destinadas a la producción de forrajes).

3. Conclusiones

La estimación muestra que aprovechando racionalmente los desperdicios generados en granjas lecheras y la energía solar, es posible lograr la sustentabilidad energética del establo.

La inversión inicial es amortizada en un lapso de 10 años o de 7.5 años con la venta de certificados de reducción de emisiones contaminantes y las emisiones de gases de efecto invernadero en CO_2 equivalente se verían disminuidas hasta en un 61%.

Se requieren más estudios donde se desarrolle una metodología para estimar las emisiones de NO_x que se generan por la quema de biogás.

Referencias

- Abbasi ,T., Tauseef, S.M. y Abbasi, S.A. (2012). *Biogas Energy*. Springer.
- AgSTAR. (2011). *AD 101 Biogas recovery systems*. US EPA. Recuperado en enero 2018 de <http://www.epa.gov/agstar/>
- ASAE (2005). *Manure production and characteristics*. ASAE D384.2.
- ASERCA (2008) Sistemas fotovoltaicos para el bombeo de agua, una alternativa para el aprovechamiento de la energía solar en el sector agropecuario. *Revista Claridades Agropecuarias*. 173, 3-25.
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E. y Burdge, J.R. (2003.) *Chemistry the central science*. (9th ed.). Prentice Hall.
- Burch, R., y Southward, B.W.L. (2001). The nature of the active metal surface of catalysts for the clean combustion of biogas containing ammonia. *Journal of Catalysis*, 198(2), 286-295. <https://doi.org/10.1006/jcat.2000.3131>
- Casas-Prieto, M., Rivas-Lucero, B. A., Soto-Zapata, M., Segovia-Lerma, A., Morales-Morales, H. A., Cuevas-González, M.I. y Keissling-Davison, C.M. (2009). Estudio de factibilidad para la puesta en marcha de los digestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de Delicias, Chih. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 24, 745-756.
- Comisión Federal de Electricidad (2018). *Tarifas generales en alta tensión*. Comisión Federal de Electricidad. Recuperado en enero de 2018 de http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp
- Dungan, R.S. (2010). Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operation and manures. BOARD-INVITED REVIEW. *Journal of Animal Science*, 88(11), 3693-3706. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3094>
- ECOFYS (2014). *Mapping carbon pricing initiatives developments and prospects*. Carbon Finance at the World Bank.
- FIRCO-SAGARPA (2013) *Criterios de elegibilidad. Programa de sustentabilidad de los recursos naturales bioenergía y fuentes alternativas 2013*.

- Intergovernmental Panel Climate Change (2006). Emissions from Livestock and manure management. En *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. (vol. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use). IPCC.
- Intergovernmental Panel Climate Change (2007) *Climate change 2007: working group III: mitigation of climate change*. IPCC fourth assessment report (AR4).
- Lansing, S., Martin, J. F., Botero, R., Da Silva, T. N. y Da Silva, E. D. (2010) Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. *Biomass Bioenergy*, 34(12), 1711-1720. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.005>
- Massé, D., Massé, L., Xia, Y. y Gilbert, Y. (2010). Potential of low-temperature anaerobic digestion to address current environmental concerns on swine production. *Journal of Animal Science*, 88(suppl. 13), E112-E120. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2432>
- McCarty, J.G. (2000). Durable catalyst for cleaner air. *Nature*, 403: 35-36. <https://doi.org/10.1038/47388>
- Méndez-Gallegos, J., Rössel, D., Amante-Orozco, A., Gómez-González, A. y García-Herrera, J. E. (2010). El Nopal en la producción de biocombustibles. *Revista Salud Pública y Nutrición* (5), 70-84.
- NMSU. (1999). *New Mexico State University. Insolation in Mexico. Azteca Solar. The Mexico Renewable Energy Program 1992-2005*. New Mexico State University,
- Rivas-Lucero, B., Zuñiga-Avila, G., Sáenz-Solis, J. I., Guerrero-Morales, S., Segovia-Lerma, A. y Morales-Morales, H. A. (2012). Perspectivas de obtención de energía renovable de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región centro-sur de Chihuahua. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 30, 872-885.
- Sanders, D., Roberts, M. C., Ernst, S. C. y Thraen, C. S. (2010). Digesters and demographics: Identifying support for anaerobic digesters on dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 93(11), 5503–5508. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3088>

- Van Horn, H., Wilkie, A. C., Powers, W. J. y Nordstedt, R. A. (1994) Components of dairy manure management systems. *Journal of Dairy Science* 77(7), 2008-2030. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77147-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77147-2)
- Wang Q., Thompson, E., Parsons, R., Rogers, G. y Dunn, D. (2011). Economic feasibility of converting cow manure to electricity: A case study of the CVPS Cow Power program in Vermont. *Journal of Dairy Science*, 94(10), 4937–4949. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-4124>
- Zhanga, C., Campana, P., Yanga, J., Zhang, J. y Yan, J. (2017). Can solar energy be an alternative choice of milk production in dairy farms? –A case study of integrated pvwp system with alfalfa and milk production in dairy farms in China. *Energy Procedia* 105, 3953 – 3959. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.822>