



## Pre-factibilidad de generación de energía en zonas ganaderas mediante la Biodigestión de residuos agropecuarios como apoyo a la transición energética en Venezuela

José A. Solano P.<sup>1</sup>

jose.solano@vepica.com

<sup>1</sup> Gerente de Ingeniería Ambiental y miembro del Centro de Excelencia VEPICA - Ambioconsult  
Estudiante de Doctorado en Desarrollo Sostenible, USB. Caracas, Venezuela

Historia del Artículo

Recibido: 6 de junio de 2019

Aceptado: 26 de julio de 2019

Disponible online: 30 de julio de 2019

---

**Resumen:** Los resultados de la Conferencia de las Partes (COP) N° 21, conocida como el Acuerdo de París en 2015, y recientemente de la COP 24 en Katowice a finales de 2018, confirman que uno de los asuntos más importantes para los países firmantes es la toma de decisiones a corto plazo respecto a las acciones de mitigación y adaptación de los impactos asociados al cambio climático. Siendo sus causantes principales la quema de combustible fósil para generación de energía y transporte, la producción industrial, y cambio en el uso de los suelos (de áreas verdes naturales a uso ganadero o urbano, por ejemplo), el calentamiento global es uno de los factores que ha llevado a asumir la transición energética de combustibles fósiles a energías más limpias como el camino para la reducción de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En este escenario, se plantea la biodigestión de residuos agropecuarios, específicamente de la ganadería, no solo como una tecnología de generación de energía renovable a partir de biogás, sino como una forma de reducir, a su vez, las emisiones directas de metano (CH<sub>4</sub>) provenientes de la degradación natural del estiércol de ganado. Este gas posee un potencial de calentamiento global (PCG) de 21 veces el potencial del CO<sub>2</sub>, y es un combustible con excelentes propiedades para la generación de energía a partir de su combustión. El presente estudio analiza la pre-factibilidad económica de la construcción de plantas de biogás a nivel agroindustrial en zonas ganaderas del país, mediante el empleo de diferentes softwares especializados, como una solución para la seguridad energética local y una contribución a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, a la vez de analizar su viabilidad para apoyar la transición energética en Venezuela.

**Palabras Clave:** Cambio climático, Transición Energética, Biodigestión, Biogás, Calentamiento global.

## Pre-feasibility of power generation in livestock areas through the Biodigestion of agricultural waste as support for the energy transition in Venezuela

**Abstract:** The results of the Conference of the Parties (COP) No. 21, known as the Paris Agreement in 2015, and recently of the COP 24 in Katowice at the end of 2018, confirm that one of the most important issues for the signatory countries is the of short-term decisions regarding the actions of mitigation and adaptation of the impacts associated with climate change. Since the main causes are the burning of fossil fuel for energy generation and transport, industrial production, and change in the use of soils (from natural green areas to livestock or urban use, for example), global warming is one of the factors that have led to the transition from fossil fuels to cleaner energies as the way to reduce global emissions of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). In this scenario, the anaerobic digestion of agricultural waste, specifically from livestock, is proposed, not only as a technology

for generating renewable energy from biogas, but as a way to reduce, in turn, direct emissions of methane ( $\text{CH}_4$ ) from the natural degradation of livestock manure. This gas has a global warming potential (GWP) of 21 times the potential of  $\text{CO}_2$ , and is a fuel with excellent properties for the generation of energy from its combustion. This study analyzes the economic pre-feasibility of the construction of biogas plants at agroindustrial level in livestock areas of the country, through the use of different specialized software, as a solution for local energy security and a contribution to reducing the emission of greenhouse gases, while analyzing its viability to support the energy transition in Venezuela.

**Keywords:** Climate change, Energy Transition, Anaerobic digestion, Biogas, Global warming.

## I. INTRODUCCIÓN

Los resultados de la Conferencia de las Partes (COP) N° 21, conocida como el Acuerdo de París en 2015 [1], y recientemente de la COP 24 en Katowice a finales de 2018 [2], confirman que uno de los asuntos más importantes para los países firmantes es la toma de decisiones a corto plazo respecto a las acciones de mitigación y adaptación de los impactos asociados al cambio climático. Siendo sus causantes principales la quema de combustible fósil para generación de energía y transporte, la producción industrial, y cambio en el uso de los suelos (de áreas verdes naturales a uso ganadero o urbano, por ejemplo), el calentamiento global es uno de los factores que ha llevado a asumir la transición energética de combustibles fósiles a energías más limpias como el camino para la reducción de las emisiones globales de los principales gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ya para el año 2010, aproximadamente el 50% de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$  provenían de la producción industrial y de la generación de energía; 50% de las emisiones de  $\text{CH}_4$  de la actividad agrícola, y 66% de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  de la actividad agrícola y silvicultura [3]. Si se analizan las emisiones por sector económico, las emisiones de GEI en términos de  $\text{CO}_2$ -equivalentes, corresponden a un 24% del total de emisiones globales provenientes del sector denominado AFOLU (Agricultura y Ganadería, Silvicultura y Otros Usos del Suelo) [4], mientras que en América Latina, la silvicultura y agricultura son responsables por 67% de las emisiones de GEI [3]. El principal GEI asociado a este sector es el metano, el cual proviene de la fermentación entérica de animales rumiantes y manejo del estiércol asociados a la actividad ganadera, lo que constituye un 40% del total de las emisiones de  $\text{CH}_4$  de las prácticas agrícolas [5].

Dado este escenario, se plantea la biodigestión (también llamada digestión anaeróbica) de residuos agropecuarios, específicamente de la ganadería, no solo como una tecnología de generación de energía renovable a partir de biogás, sino como una forma de reducir, a su vez, las emisiones directas de metano provenientes de la degradación natural del estiércol de ganado. Este gas posee un potencial de calentamiento global (PCG) de más de 21 veces el potencial del  $\text{CO}_2$

[4], y es un combustible con excelentes propiedades para la generación de energía a partir de su combustión. En el presente estudio se analiza la pre-factibilidad económica de la construcción de plantas de biogás a nivel agroindustrial en zonas ganaderas del país, mediante el empleo de software especializado, como una solución para la seguridad energética local y una contribución a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, a la vez de analizar su viabilidad para apoyar la transición energética en Venezuela.

## II. ANTECEDENTES

### A. Situación del Servicio Eléctrico en Venezuela

En la literatura se reportan varios estudios y análisis sobre la situación del sector eléctrico en Venezuela, cuya situación de deterioro actual se ha venido alertando desde hace ya un par de años. Lara [6] reporta que para el año 2018 el consumo de energía del país estaba alrededor de 100.000 GWh. Por su parte, Hernández [7], reporta que para el 2018 la matriz energética de Venezuela estaba constituida principalmente por fuentes de energía termoeléctrica (53,5%), hidroeléctrica (46,2%) y eólica (0,3%), con una capacidad instalada de 36.560 MW (que cubriría 2,6 veces mayor que la demanda máxima del país). Sin embargo, de esta capacidad instalada, para el año 2018 sólo estaba operativo menos del 38%, pasando a ser la energía hidroeléctrica la principal fuente de suministro de electricidad con un 68,8%, termoeléctrica con 31,1% y eólica con 0,1%. Esto explica el por qué, al presentarse las fallas recientes en el suministro hidroeléctrico durante el mes de marzo 2019, las consecuencias hayan sido catastróficas en múltiples sectores económicos y por supuesto, con consecuencias en la calidad de vida de la población, manifestándose lo que el Ing. Hernández denomina *inseguridad energética*.

Para tener una idea de las consecuencias en números, FEDENAGA [8], reportó que durante el mes de marzo del presente año, las fallas del servicio eléctrico implicaron la pérdida de 5.041.096 litros de leche, 2.996.264 kg de queso y 3 millones de kg de carne, con pérdidas aproximadas de más de 5,7 MMUS\$ (millones de dólares americanos). En este sentido, si se reporta una población de 11 millones de cabezas de ganado (carne y lácteos) para 2018 [9], con una

generación estimada de estiércol de 344 mil ton/día, y si este residuo fuese aprovechado mediante el proceso de biodigestión, esto implicaría una generación de aproximadamente 6,7 MM m<sup>3</sup>/día (millones de metros cúbicos por día) de biogás, lo que equivaldría a una capacidad de generación de 500 MW, que no sólo hubiese evitado las pérdidas de alimentos y pérdidas económicas del sector ganadero, sino que podría haber garantizado el servicio eléctrico de hasta 100.000 viviendas rurales (cálculos propios) de centros poblados ubicados en las principales zonas ganaderas del país. En el siguiente apartado se presentan algunas características básicas del biogás y del proceso de digestión anaeróbica, como tecnología de manejo de residuos agropecuarios.

### B. El Biogás y la Digestión Anaeróbica

El biogás es una mezcla de gases obtenido por el proceso de biodigestión, compuesto por aproximadamente 50-70% de metano, y el resto es dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua [10]. Asimismo, tiene una capacidad energética aprovechable, cuya equivalencia es de 2,2 kWh de electricidad por cada metro cúbico de biogás.

En cuanto a la biodigestión o digestión anaeróbica, es un proceso de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno estudiado desde hace muchos años a nivel global, y su aplicación como fuente de biogás mediante biodigestores, se empezó a emplear a finales del siglo XIX [11]. Este proceso pasa por cuatro etapas diferenciadas, influenciadas por la temperatura y tiempo de retención: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Asimismo, puede manejar distintos tipos de biomasa, como lo son restos agroindustriales (celulosa), estiércoles, efluentes y lodos de aguas residuales (industriales o domésticas). Existen distintos tipos de biodigestores según su configuración [12], como lo son el tipo Chino (domo fijo), tipo Hindú (domo flotante), que son de baja complejidad de operación y empleados comúnmente de forma doméstica; tipo Taiwán o tubulares (cilindro-pistón) y tipo laguna cubierta, que también son de una complejidad baja a intermedia, empleados típicamente en aplicaciones agrícolas (ver Figura 1); y digestores de operación más compleja y de aplicación industrial como los tipo tanques verticales (reactores-tanques de agitación continua). Para el presente estudio, se analiza el uso de un biodigestor tipo laguna cubierta, que es el recomendado para aplicaciones agropecuarias por su versatilidad, costos y rendimientos en climas tropicales [10] [11].

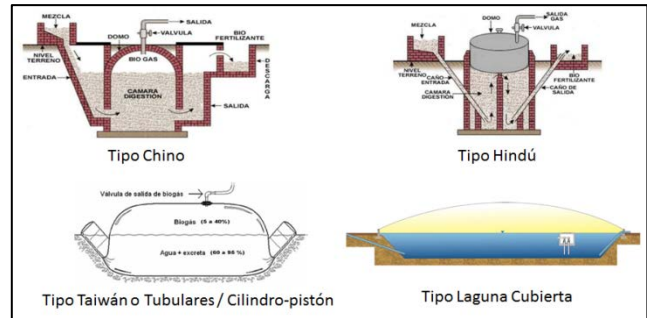


Figura 1: Tipos de Biodigestores. Fuente: Elaboración propia

Entre las ventajas principales que presenta este proceso se tienen [13]:

- Recuperación de residuos para obtener un gas combustible aprovechable para la generación de energía,
- Producción de digestato (lodo y biol) inerte, con potencial uso como fertilizante y riego de los propios terrenos de la finca,
- Bajo requerimiento de personal operativo,
- Impacto social positivo ya que ayuda a garantizar medios de vida (uso del gas para electricidad o cocina) y promover la seguridad energética,
- Reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> (CO<sub>2</sub>eq) de 85% en promedio [14], certificables para la obtención de bonos de carbono.

Para el año 2012, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) hizo un análisis comparativo del nivel de madurez entre diferentes tecnologías de generación de energía mediante el uso de biomasa, en el cual la digestión anaeróbica ya se encontraba en el rango de "Tecnología Madura" [15]. Esto a su vez fue validado en el estudio de Rojas y Ruiz [11], en el que emplearon la metodología TRL (*Technology Readiness Levels*) para determinar el nivel de madurez de la tecnología de biodigestión, en el que reportaron un nivel 9 (nivel máximo) para los criterios: entorno de la investigación (sistema probado con éxito en entorno real), desarrollo tecnológico e innovación (aplicación a nivel comercial) y aplicación práctica (nivel de despliegue global). Entre los países principales productores de energía a partir de biogás se encuentran: Alemania, Reino Unido, Suecia, Dinamarca, Francia, República Checa y Holanda como los líderes en el mercado europeo; Estados Unidos, China, Japón, Canadá e India, como principales productores fuera del bloque europeo. En América Latina, los principales productores son Brasil, Chile, Argentina, Perú, Ecuador y Uruguay [16].

### C. Experiencia con Biogás en Venezuela

En Venezuela, no hay reportes formales de la implantación de biodigestores para uso agropecuario, sino principalmente experiencias a nivel artesanal y local en diferentes regiones del país. Aqualimpia [17] reporta el caso de Matadero Carnes El Pazo, estado Lara en 2012, para el procesamiento de los efluentes provenientes del beneficio de 800 cabezas de ganado vacuno, 2.000 cerdos y 450 cabezas de ganado caprino por día. Para ello, se construyó un biodigestor tipo laguna cubierta de 15.000 m<sup>3</sup>, cuyo biogás producido es aprovechado como combustible en reemplazo del fuel oil para las calderas (ver Figura 2).



**Figura 2:** Biodigestor tipo laguna cubierta instalado en Matadero El Pazo [17]. **Fuente:** Aqualimpia, 2012

Por otra parte, hay un estudio elaborado por Mago y col. [18] de la Universidad de Carabobo en 2014, en el cual emplearon el software BioDigestor© de Aqualimpia para el diseño de un digestor enterrado con geomembrana para procesar el estiércol generado por 2.000 cabezas de ganado (toros). En dicho estudio reportan una generación de 1.331.996 kWh/año, suficiente para electrificar a los centros poblados rurales del estado Guárico. Sin embargo, no reportan análisis costo-beneficio asociado a esta instalación.

### D. La Transición Energética en Venezuela

Sánchez [19] define la transición energética como: "...la transformación radical del esquema actual de oferta y demanda de energía a escala mundial, en la cual las fuentes renovables de energía y el aumento de la eficiencia energética desplazan significativamente a los combustibles fósiles del mercado." Básicamente, es pasar de la generación de energía mediante la quema de combustibles fósiles (diesel, gasolina, gas natural) a un esquema de bajo carbono mediante la implementación de energías renovables para cubrir la demanda energética de la población y su desarrollo. Sánchez reporta que en Venezuela hay un potencial de generación de 37.600 MW por energía hidroeléctrica; un potencial de 5 kWh/m<sup>2</sup>.día para energía solar, y 45.200 MW por energía eólica, sin contar con potenciales aplicaciones de biocombustibles como el

bioetanol y el biogás, con lo que se cubriría con creces la demanda energética de nuestro país. Sin embargo, se deben considerar los siguientes factores y barreras a la transición energética en nuestro país:

Factores que promueven la Transición Energética:

- Cambio Climático (emisiones de CO<sub>2</sub>),
- Protección a la salud de las personas (gases de combustión, hollín, smog),
- Costos ocultos del uso de los combustibles (daños al ambiente y a la salud),
- Volatilidad de los precios (global), principalmente de los hidrocarburos,
- Geopolítica de la energía: resultados Acuerdo de París (COP 21), desarrollo tecnológico, cambios en políticas y normativas internas, incentivos.

Barreras a la Transición Energética:

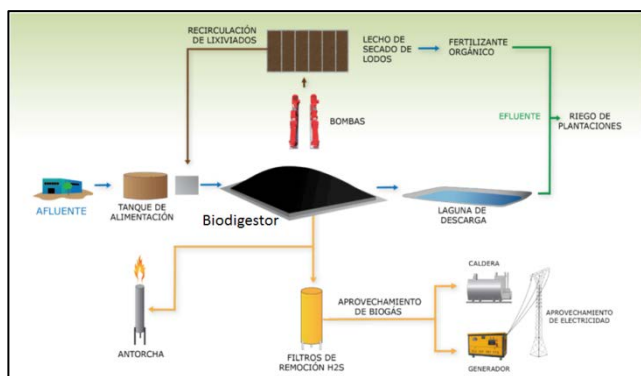
- Subsidio al combustible y electricidad,
- Falta de política impulsora y de estímulo a la inversión en fuentes renovables,
- Falta de marco legal, normas técnicas, programas de formación e investigación,
- Ausencia de una Autoridad ante el Cambio Climático para garantizar el acceso a los Fondos Verdes,
- Ausencia de voluntad política.

Con base en todo lo anteriormente expuesto, en las siguientes secciones se analiza la pre-factibilidad económica de la generación de energía en zonas ganaderas mediante la biodigestión de estiércol de ganado vacuno para apuntalar la transición energética en Venezuela, a la vez de contribuir a la seguridad energética local y a la mitigación del cambio climático.

## III. METODOLOGÍA

### A. Diseño del Biodigestor

Se conceptualizó el diseño de la planta de biodigestión, la cual está comprendida por los siguientes procesos o unidades principales: pre-acondicionamiento (homogenización del estiércol en el tanque de alimentación), tanque de biodigestión, almacenamiento y tratamiento del digestato (lecho de secado), manejo del biogás (filtros para remover el azufre y quemador) y generación de electricidad (grupo electrógeno), como se ilustra en la Figura 3 a continuación.



**Figura 3:** Esquema típico de la Planta de Biodigestión.  
Fuente: Aqualimpia, 2014

Se hizo uso del software especializado BioDigester Pro© v. 3.0, licenciado por Aqualimpia, para el dimensionamiento de estas unidades a diferentes escalas de producción: 50, 100, 250, 500, 1.000 y 1.500 cabezas de ganado de una granja ubicada en los llanos occidentales. En la Tabla I, se presentan los parámetros de diseño como elementos de entrada del software [10] [20].

**Tabla I:** Parámetros de diseño como elementos de entrada del software BioDigester Pro©

Parámetros de Diseño	
Cabezas de ganado	50-100-250-500-1.000-1.500
Peso promedio animal	480 kg (vacuno lechero)
Estiércol por 100 kg/animal	8,7%
Eficiencia recolección del estiércol	85%
C/N	25:1
%Masa seca (MS)	8% (5-15%)
%Masa volátil (MV)	83% (90-95% MS)
Tasa de dilución (%sólidos)	10% (8-12)
TRH	30 días (20-35)
Temperatura	36°C
Carga Orgánica Volumétrica (COV)	2,17 kg/m <sup>3</sup> .d (2-3)
Datos climáticos promedio	Temperatura mínima, media y máxima (°C) y días/año de cada una

### B. Estimación de la Reducción de Emisiones de Metano

Para la estimación de la reducción de emisiones de metano obtenida por el manejo del estiércol mediante la biodigestión, se emplearon las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI [21]. Básicamente, consistió en la estimación de las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes del manejo de estiércol mediante digestión anaeróbica, determinando el factor de emisión para un cálculo nivel 2 (según las

directrices del IPCC), empleando factores de conversión específicos y para una eficiencia de recolección de estiércol de 85%. Luego se estimó la reducción neta de emisiones de CO<sub>2</sub>eq, empleando las siguientes expresiones:

$$\text{Ton CH}_{4, \text{BD}} \times 21 = \text{Ton CO}_{2\text{eqBD}} \quad (1)$$

$$\text{Ton CO}_{2, \text{Comb}} = \text{Ton CH}_{4, \text{BD}} \times C_{\text{pCH}_4} \times 55,5 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\text{Ton CO}_{2\text{eq netas}} = \text{Ton CO}_{2\text{eqBD}} - \text{Ton CO}_{2, \text{Comb}} \quad (3)$$

$$\% \text{Reducción} = \text{Ton CO}_{2\text{eq netas}} / \text{Ton CO}_{2\text{eqBD}} \quad (4)$$

Donde **Cp** es la capacidad calórica del metano (kJ/kg).

### C. Estimado de Costos

Con la definición de la ingeniería a un nivel conceptual, pre-dimensionamiento de equipos mayores y tecnología seleccionados, corresponde un estimado de costos Clase IV para pre-factibilidad, según la AACE [22]. En el presente estudio, se estimaron los costos de las unidades principales con un grado de incertidumbre de +50%/-30%, los cuales fueron cargados al programa Biodigestor Pro© para la obtención del estimado de inversión de la planta y comparación con los órdenes de magnitud reportados en la literatura para casos en América y Europa, para luego proceder al posterior análisis costo-beneficio.

### D. Análisis Costo-Beneficio

El software Biodigestor Pro© permite el análisis de la rentabilidad del primer año del proyecto de biodigestión, mediante el cálculo de costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, depreciación, imprevistos, etc., obteniendo finalmente un balance de ingresos y egresos del proyecto, para cada escala analizada. Para un análisis costo-beneficio más completo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los costos de plantas de biodigestión de estiércol de ganado tipo laguna cubierta, una revisión de índices de costos nivelados de la energía (LCOE) de diferentes energías renovables y cálculo del LCOE del sistema bajo análisis para poder obtener resultados comparables. Para el cálculo del LCOE del biodigestor para cada escala bajo análisis, se empleó la expresión sugerida por Hernández [23], que es la siguiente:

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=1}^n \text{I}_t + \text{G}_t * (1 - \text{IM}) - \text{D}_t * \text{IM}}{\sum_{t=1}^n \text{E}_t * (1 - \text{IM})} \quad (5)$$

Donde:

**I** = Inversión

- E = Energía eléctrica generada
- G = Gastos de operación y mantenimiento
- IM = Impuesto sobre la renta (tasa de descuento, 10%)
- D = Depreciación
- n = Horizonte económico (20 años)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Diseño del Biodigestor

Luego de ingresar todos los datos de diseño como elementos de entrada del software BioDigestor Pro© para cada escala analizada, el programa permite obtener los cálculos de la producción de biogás, metano, y potencia de generación de energía esperada, así como vistas de la configuración de la planta, tal como se presenta en la Figura 4.

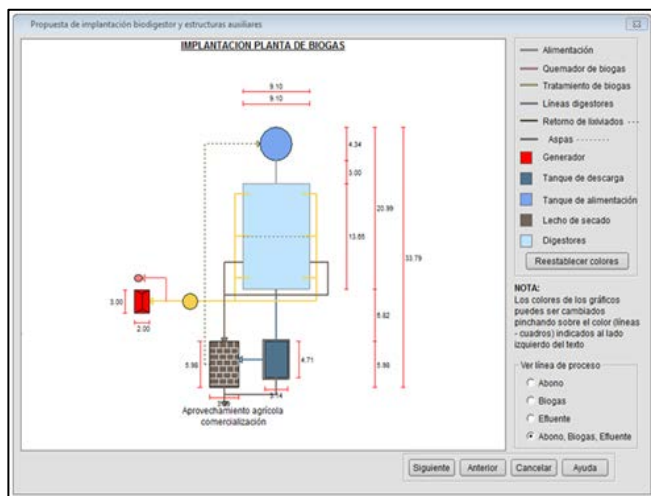


Figura 4: Esquema con la vista de planta del sistema para 500 cabezas de ganado. Fuente: BioDigestor Pro©

Por ejemplo, para 500 cabezas de ganado, se estima una superficie requerida de 600 m<sup>2</sup> para la implantación de la planta de biogás. Los cálculos obtenidos son luego utilizados para la estimación de reducción de emisiones y el análisis costo-beneficio.

B. Estimación de la Reducción de Emisiones de Metano

Acorde a las directrices del IPCC, se emplearon los factores específicos aplicables a la región y características del caso, y se obtuvo un Factor de Emisión para el manejo de estiércol mediante digestión anaeróbica FE<sub>BD</sub> = 81,0 kg CH<sub>4</sub>/animal.año. Luego, con las ecuaciones presentadas en la sección de metodología, se estimó la reducción de emisiones de metano asociadas a la implementación de un sistema de biodigestión para el manejo de estiércol (Tabla II).

Como se puede apreciar en la Tabla II, los cálculos obtenidos indican que indiferentemente de la escala de la planta, el sistema puede alcanzar una reducción de emisiones de metano de hasta 86,8%, lo cual está dentro del orden de magnitud esperada según lo

reportado en la literatura consultada. Esta reducción de emisiones, al estar estimada según las directrices del IPCC, puede ser certificable para optar a bonos de reducción de emisiones (CERs, por sus siglas en inglés), lo cual puede significar un ingreso para el productor. Esto se analizará en las siguientes secciones.

Tabla II: Parámetros de diseño como elementos de entrada del software BioDigestor Pro©

Cabezas de ganado	E CH <sub>4</sub> BD (ton/año)	E CO <sub>2</sub> eq BD (ton/año)	E CO <sub>2</sub> quema CH <sub>4</sub> (ton/año)	E CO <sub>2</sub> eq netas BD (ton/año)	% Red. CO <sub>2</sub> eq BD
50	4,1	85,1	11,3	73,8	86,8%
100	8,1	170,1	22,5	147,6	86,8%
250	20,3	425,4	56,3	369,1	86,8%
500	40,5	850,7	112,5	738,2	86,8%
1.000	81,0	1.701,5	225,1	1.476,4	86,8%
1.500	121,5	2.552,2	337,6	2.214,6	86,8%

E: Emisiones. % Red.: porcentaje de reducción.

C. Estimado de Costos

Se realizó el estimado de los equipos de las unidades principales, y de los costos de materiales de construcción (costos actuales en Venezuela), obteniéndose con la ayuda del software BioDigestor Pro©, el estimado de inversión de cada escala analizada (Tabla III). Este estimado se comparó con casos de estudios reportados en diferentes países, teniendo en consideración que la comparación debía hacerse para casos con el siguiente criterio: manejo de estiércol de ganado vacuno lechero mediante un biodigestor tipo laguna cubierta.

Tabla III: Estimación de Costos de Inversión\*

Cabezas de ganado	CI obtenido (US\$)	CI México (US\$)[24]	CI Chile (US\$)[25]	CI EE.UU. (US\$)[26]	CI Europa (US\$)[27]
50	98.874	106.539	72.566	52.191	19.757
100	106.876	106.689	181.414	104.382	39.513
250	123.968	107.141	435.393	260.955	88.905
500	178.707	107.895	907.070	521.909	177.809
1.000	269.452	109.401	1.777.856	1.043.819	365.497
1.500	285.533	110.908	2.684.926	1.565.728	543.307

\*Todos los CI (costos de inversión) reportados fueron escalados a costos en dólares americanos de 2019.

En la Tabla III, se puede apreciar que el orden de magnitud de la inversión obtenido se encuentra dentro del rango reportado en la literatura y que es similar para la mayoría de los diferentes casos reportados, especialmente para la escala de 100 cabezas de

ganado. Asimismo, los órdenes de magnitud obtenidos para todas las escalas son más cercanos a los casos reportados por México y Europa, tendiendo a divergir progresivamente al aumentar la escala en comparación con los casos reportados por Chile, EE.UU. y Europa, como se ilustra en la Figura 5 a continuación. Es importante destacar que los casos reportados no indican la clase o nivel de incertidumbre de su estimado.

Por otra parte, las razones de la divergencia en algunos casos se deben a que los costos son muy sensibles al tipo de sustrato, configuración y tipo de biodigestor, y que hay una influencia importante del clima local (requerimientos de calefacción para que ocurra el proceso en climas fríos) y adicionalmente hay que tener en cuenta los costos locales específicos asociados a la logística, transporte de materiales, equipos e insumos, mano de obra, etc., para la construcción del sistema.

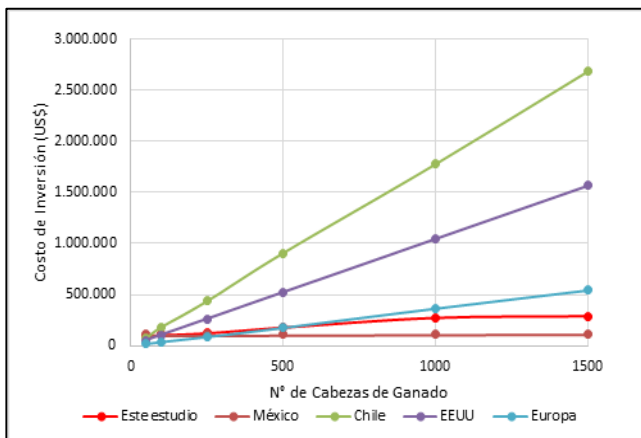


Figura 5: Comparación de costos de inversión. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, las políticas económicas en cuanto a subsidios del combustible y la electricidad, que favorecen el abastecimiento energético mediante el uso de otras tecnologías como las plantas eléctricas, aunado a un severo proceso inflacionario, tienen un peso importante al momento de la revisión de estos estimados de costos locales y en la toma de decisiones sobre la viabilidad de este tipo de proyectos en nuestro país.

Adicionalmente, se analizó el costo por unidad de potencia eléctrica a ser generada. En la Figura 6 se ilustra la relación obtenida entre el costo de inversión y la potencia instalada según los resultados del software empleado.

En el gráfico de la Figura 6 se evidencia un comportamiento de economía de escala: a mayor tamaño de planta, disminuye el costo por kW instalado hasta estabilizarse a un valor asintótico, lo cual es un

comportamiento típico de sistemas de generación de energía mediante fuentes renovables.

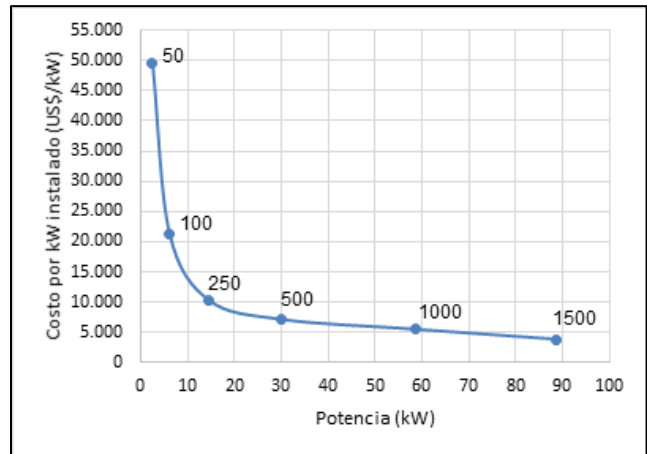


Figura 6: Relación entre Costo de Inversión y Potencia Instalada obtenida. Fuente: Elaboración propia

D. Análisis Costo-Beneficio

Los resultados del análisis costo-beneficio se estructuraron de la siguiente forma: generación de electricidad y demanda a cubrir; ingresos, egresos y rentabilidad; flujo de caja y comparación del costo nivelado de la energía (LCOE) obtenidos.

a) Generación de Electricidad y Demanda a Cubrir

Los resultados obtenidos de generación de electricidad y demanda a cubrir se presentan en la Tabla IV. En dicha tabla se puede apreciar que, a partir de 100 cabezas de ganado, el sistema puede generar la energía para cubrir el consumo propio de la planta, la demanda de una vivienda rural típica y las operaciones de la granja lechera. Sin embargo, hay que analizar la rentabilidad de cada escala, como se describe en el siguiente apartado.

Tabla IV: Generación de electricidad y demanda a cubrir

Cabezas de ganado	Gen. Elec. (kWh/d)	Nº de Viviendas Rurales*	Consumo** Granja Lechera (kWh/año)[28]	% Demanda Cubierta Granja
50	59	0,3	12.927	98%
100	118	1,0	25.855	112%
250	295	2,6	64.636	123%
500	589	5,6	129.273	126%
1.000	1.179	11,1	258.545	128%
1.500	1.769	16,9	387.818	129%

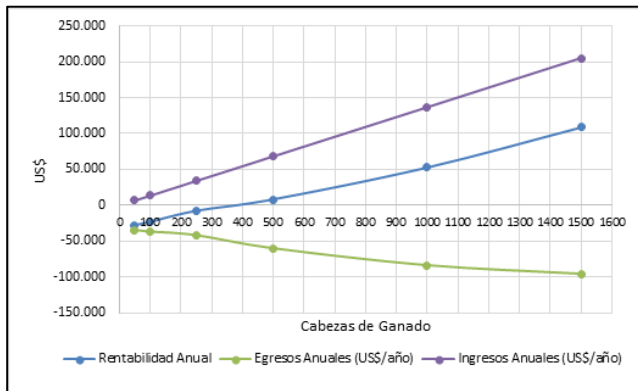
\*Estimado en aproximadamente 4 kWh/día en promedio.  
 \*\*Ordeño, limpieza, desinfección, y enfriamiento. Puede variar considerablemente entre granjas, debido a la configuración específica de la operación.

b) Ingresos, Egresos y Rentabilidad

Luego de revisar los estudios reportados en otros países, se analizó el por qué estos sistemas son viables y rentables en la mayoría de los casos, y se concluyó que es debido a tres aspectos fundamentales: ahorro en el consumo de energía eléctrica externa y venta de energía excedente; ahorro en el uso de fertilizantes y agroquímicos (por el uso del lodo y biol resultante del proceso); e ingresos por los bonos CER asociados a la reducción de emisiones de metano. Analizando estos tres aspectos en nuestro país, resultó lo siguiente:

- Dado que la energía eléctrica está bajo un fuerte subsidio, y legalmente el Estado es el único ente facultado para su generación y distribución (no está permitido enviar a la red ningún excedente generado), los ingresos o ahorros por este concepto son nulos;
- Se determinó un costo local de abono orgánico sólido para estimar los ingresos (visto como ahorros) asociados a la producción y uso de los lodos en los terrenos de la propia finca;
- Se determinó el valor de los bonos CER, el cual para el momento del presente estudio, se encontraba en 25 US\$/ton CO<sub>2</sub> [29].

A continuación, en la Figura 7 se ilustra un gráfico para analizar la rentabilidad del primer año de operación del sistema de biodigestión.



**Figura 7:** Ingresos, egresos y rentabilidad anual (BD tipo Laguna Cubierta). **Fuente:** Elaboración propia

Del gráfico de la Figura 7 se puede apreciar que a partir de 400 cabezas de ganado, el ahorro por

fertilizante y los bonos CERs cubren los egresos anuales durante el primer año. De esto se infiere que, para escalas menores de producción, sería más rentable la implementación de biodigestores tubulares de membrana de polímeros, que son menos costosos y más simples de operar para pequeños volúmenes de sustratos generados.

c) Flujo de Caja

Una vez determinados el costo de inversión, los ingresos y egresos, se preparó un flujo de caja a 10 años con una tasa de descuento del 10% anual, para determinar a partir de qué escala, con una tasa interna de retorno (TIR) mayor a 12%, sería atractivo el proyecto para inversionistas. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla V, de cuyos datos se hizo una interpolación para un Valor Presente Neto (VPN) ≥ 0, para determinar a partir de qué escala empieza a ser rentable el proyecto (835 cabezas de ganado), y para una TIR ≥ 12%, lo cual se logra a partir de 980 cabezas de ganado.

d) Costo Nivelado de la Energía (LCOE)

Se determinó el LCOE para el proyecto, y así poder comparar el costo de la energía generada por la digestión anaeróbica con otras fuentes de energía renovable: solar, eólica e hidroeléctrica. Los resultados se presentan en la Tabla VI, los cuales reflejan, en primer lugar, la tendencia de reducción del LCOE con los años, en consistencia con el desarrollo tecnológico y la economía de escala (a mayor potencia instalada, menor LCOE). En segundo lugar, se puede apreciar que la hidroelectricidad se mantiene como la opción más barata para grandes cantidades de energía.

Se obtuvo un LCOE para los casos de estudio entre 41-437 US\$/MWh, el cual al compararlo con otros índices para la generación de energía a partir de biogás, se observa que el rango obtenido es más amplio y se estima que esta variación se basa en la dependencia de factores específicos como la potencia instalada y características locales de la instalación.

**Tabla V:** Flujo de caja del proyecto a 10 años

Escala	50	100	250	500	1000	1500
<b>Costo total inversión</b>	-98.874,00	-106.876,00	-123.968,00	-178.707,00	-269.452,00	-285.533,00
<b>Ingresos netos Año 1</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 2</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 3</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 4</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66



<b>Ingresos netos Año 5</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 6</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 7</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 8</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 9</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>Ingresos netos Año 10</b>	-28.084,48	-23.544,96	-7.988,39	8.084,22	52.776,44	109.023,66
<b>TIR 10 años</b>	-	-	-	-12%	14,6%	36,5%
<b>VPN</b>	-271.440,96	-251.549,56	-173.053,20	-129.032,96	54.836,38	384.370,20

**Tabla VI:** LCOE obtenido en comparación con otras energías renovables

Tipo de Energía Renovable	Potencia Instalada (MW)	Costo por kW instalado (US\$)	Costo de operación (US\$/kW)	LCOE, TD=10% (US\$/MWh)	Fuente
Solar Fotovoltáica (servicios, panel fijo)	0,5–100	2.700–5.200	14–69	160-520	Bruckner y col., en IPCC, 2011. Anexo III 4to Informe [30]
		1.700-4.300	12–30	170-400	Schlömer S. y col., en IPCC, 2014. Anexo III 5to Informe [31]
		950-1.250	-	<b>40-46</b>	Lazard, 2018 [32]
Eólica (tierra firme)	5–300	1.200–2.100	12–23	52-170	Bruckner y col., en IPCC, 2011. Anexo III 4to Informe [30]
		1.200-3.700	0-60	92-300	Schlömer S. y col., en IPCC, 2014. Anexo III 5to Informe [31]
		1.150-1.550	-	<b>29-56</b>	Lazard, 2018 [32]
Hídrica (grandes turbinas)	<0,1 – >20.000	1.000–3.000	25–75	24-150	Bruckner y col., en IPCC, 2011. Anexo III 4to Informe [30]
		500-8.500	5-250	9-150	Schlömer S. y col., en IPCC, 2014. Anexo III 5to Informe [31]
		500-4.500	-	<b>40-60</b>	IRENA, 2018 [33]
Biogás (digestión anaeróbica)	1	2.574-6104	54-195	60-150	IRENA, 2012 [15]
	-	-	-	130	World Energy Council, 2013 [34]
	0,06-0,585	2.275-4.420	-	27-56	Oreggioni y col., 2017 [35]
	0,002-0,09	3.860-49.500	156-2.157	<b>41-437</b>	Este estudio

Finalmente, se observa que en promedio, el biogás puede ser una opción más costosa que la solar o eólica, pero que tiene potencial de combinarse con ellas y generar soluciones híbridas, para obtener soluciones viables económicamente y que contribuyan a mitigar el cambio climático, dependiendo de la escala, lugar, demanda a cubrir, incentivos locales, entre otros factores, mientras se realizan las obras correctivas y complementarias del sistema de generación eléctrica nacional para recuperar la seguridad energética en el país, especialmente en zonas ganaderas.

**V. CONCLUSIONES**

Las conclusiones principales del presente estudio se listan a continuación:

- Es factible la generación de energía mediante la combustión de biogás proveniente de la digestión anaeróbica de estiércol de ganado vacuno, para cubrir los requerimientos de energía de la finca productora y su vivienda a partir de 100 cabezas de ganado.

- En Venezuela, la viabilidad económica de un proyecto de Biodigestión depende de la posibilidad de optar a financiamiento “verde” para el capital de inversión y a los bonos CERs, además de considerar el ahorro por obtención de fertilizante de suelos como subproducto.
- En este sentido, el análisis costo-beneficio indica que para que el proyecto sea atractivo financieramente, la escala debe ser mayor a 980 cabezas de ganado (TIR>12% a 10 años).
- Como no existe una única solución tecnológica absoluta, la Biodigestión puede apoyar la transición energética en el país, en conjunto con otra fuente renovable como la energía solar, para garantizar la seguridad energética en zonas ganaderas, mientras se desarrollan y construyen gasoductos para el aprovechamiento del gas natural quemado actualmente, nuevas fuentes de energía limpia (hídrica) y sus sistemas de transmisión.

VI. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se indican las siguientes recomendaciones:

- Rescatar la institucionalidad, para este y cualquier otro proyecto de energía renovable, junto al desarrollo de políticas, normas, incentivos y eliminación progresiva al subsidio del combustible fósil para promover la transición energética en el país.
- Presentar estos proyectos ante la Autoridad Nacional para el Cambio Climático (una vez designada) y optar por líneas de crédito “verdes”, acorde a los criterios de elegibilidad principales: proyectos en energía renovable y reducción de emisiones GEI.
- Continuar con el ajuste de la incertidumbre del estimado de costos para un caso de aplicación específica en el país, que puede incluir la implementación de “Mini-redes” autónomas según las tendencias innovadoras en el área.
- Complementar el uso de biodigestores en fincas ganaderas con las prácticas denominadas agrosilvopastoriles, que se basan en la siembra combinada de árboles, follaje y leguminosas, planificación de pastoreo, control de erosión y gestión de cuencas hidrográficas, entre otras, para el diseño de fincas climáticamente resilientes.

AGRADECIMIENTOS

A Vepica y su Departamento de Energías Alternativas, por haber proporcionado los recursos para adquirir el software BioDigestor Pro®.

REFERENCIAS

[1] UNFCCC Process and Meetings. COP 21. <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/paris-climate-change-conference-november-2015/cop-21>.

[2] J.C. Sánchez, *Resultados de la COP 24. Reglamentación del Acuerdo de París*, ponencia realizada en la USB, Sartenejas, Venezuela, Abril 2019.

[3] Instituto Interamericano para el Desarrollo Económico y Social, *Fundamentos de Cambio Climático*, curso online disponible en <https://indesvirtual.iadb.org/course/view.php?id=352>, Banco Interamericano para el Desarrollo (BID), 2010.

[4] Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs, 2014.

[5] P. Smith, M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E. A. Elsiddig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N. H. Ravindranath, C. W. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, y F. Tubiello, 2014. *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*, en *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth,

A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

[6] M., Lara, *Situación Actual y Futura de la Electricidad en Venezuela*, ponencia del Ciclo de Conversatorios y Conferencias: Realidades Globales de la Energía y el Petróleo. UNIMET, Caracas, Venezuela, 2018.

[7] N. Hernández, *Contexto Actual de la Energía en Venezuela*, artículo disponible en [https://es.scribd.com/document/384412041/Contexto-actual-de-la-energia-en-Venezuela-JUL18-Nelson-Hernandez#from\\_embed](https://es.scribd.com/document/384412041/Contexto-actual-de-la-energia-en-Venezuela-JUL18-Nelson-Hernandez#from_embed), 2018.

[8] M. Moreno, *FEDENAGA: se Perdieron 3 Millones de Kilos de Carne por el Apagón*, artículo disponible en <http://puntodecorte.com/fedenaga-se-perdieron-3-millones-de-kilos-de-carne-por-el-apagon/>, Marzo de 2019.

[9] M. Gutiérrez, *Mirada del Sector Agropecuario de Venezuela en este 2018 por el USDA*, artículo disponible en <https://avicultura.info/mirada-del-sector-agropecuario-de-venezuela-en-este-2018-por-el-usda/>, Agosto de 2018.

[10] G. Moncayo, *Manual de Dimensionamiento y Diseño de Biodigestores Industriales para Clima Tropical*, Aqualimpia Engineering e.k., Alemania, 2014.

[11] E. Rojas, y D. Ruiz, *Determinación del Nivel de Madurez y las Capacidades de las Tecnologías Existentes para la Transformación de Biomasa Residual en Energía Eléctrica*. Trabajo de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2018.

[12] T. Toscano, *Diseño de un Biodigestor Anaeróbico para la Obtención de Biogás, a partir de las Excretas de Ganado Vacuno en el Rancho Guadalupe, en el Cantón Mocha Provincia de Tungurahua*, Trabajo de Grado de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador, 2016.

[13] J. Pérez, *Diseño de un Biodigestor para Aplicación en Pequeños Ganaderos y Lecheros*, Trabajo de Grado de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile. Santiago de Chile, Marzo de 2010.

[14] D. Parra, M. Botero, y J. Botero, *Biomasa Residual Pecuaria: Revisión sobre la Digestión Anaerobia como Método de Producción de Energía y otros Subproductos*. Revista UIS Ingenierías, Vol. 18, N°1, pp. 149-160, 2019.

[15] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Biomass for Power Generation*, Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Volume 1: Power Sector, Junio de 2012.

[16] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Capacity Statistics*, reporte disponible en: [www.irena.org/Publications](http://www.irena.org/Publications), 2017.

[17] Aqualimpia, *Biodigestor en Matadero de Reses y Cerdos Matadero Carnes El Pazo – Venezuela*, disponible en <https://www.aqualimpia.com/matadero-cerdos-reses-cep/>, 2012.

[18] M. Mago, J. Sosa, B. Flores y L. Tovar, *Propuesta de Diseño de una Planta de Biogás para la Generación de Potencia Eléctrica en Zonas Pecuarias de Venezuela a través del Programa Biodigestor®*, Revista Ingeniería UC, Vol. 21, No. 2, pp. 60-65, Agosto 2014.

[19] J.C. Sánchez, *La Transición Energética y su Incidencia en Venezuela*. Fundación Friedrich Ebert Stiftung (FES). Venezuela, 2016.

[20] Aqualimpia Beratende Ingenieure, *Manual de Usuario Software BioDigestor Pro v. 3.0*, 2009.

[21] H. Dong, J. Mangino y T. McAllister, *Emisiones Resultantes de la Gestión del Ganado y del Estiércol*, en *Directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, Vol.4, Capítulo 10*, 2006.

[22] AACE, Inc, *Sistema de Clasificación para Costos Estimados – Cómo Aplicarlo en Ingeniería, Contratación y Construcción para los Procesos Industriales*, Práctica recomendada por la AACE No° 18 R-97, 2011.

- [23] N. Hernández, *¿Qué es el costo nivelado de la energía eléctrica (LCOE)?*, artículo disponible en <https://app.box.com/s/92ovuhb2py59nhtzfn4um90hw0r4ae>, 2015.
- [24] M. Casas, B. Rivas, M. Soto, A. Segovia, H. Morales, M. Cuevas y C. Keissling, *Estudio de Factibilidad para la Puesta en Marcha de los Digestores Anaeróbicos en Establos Lecheros en la Cuenca de Delicias, Chihuahua*, Revista Cuarta Época, Año XIII, Volumen 24, pp. 745-756, Enero-Junio de 2009.
- [25] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), *Biogás en el Sector Lechero en Chile. Guía para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento, Seguimiento y Control de Plantas de Biogás en Pequeña y Mediana Escala Enfocadas al Sector Lechero en Chile*, 2017.
- [26] S. Lansing, s. y K. Klavon, *Small-Scale Anaerobic Digestion in the United States: Design Options and Financial Viability*, Department of Environmental Science and Technology, University of Maryland, MD, USA, 2010.
- [27] Fachverband Biogas, *Aprovechamiento energético de biomasa: ¿Un negocio verde y una opción para Colombia?*, ponencia del Comité de Ganaderos Cucuta y Villavicencio, Colombia, 2016.
- [28] D. Bartolomé, R. Posado, R. Bodas, M. Tabernero de Paz, J. García, y S. Olmedo, *Caracterización del Consumo Eléctrico en las Granjas de Vacuno Lechero de Castilla y León*. Revista Archivos de Zootecnia vol. 62, núm. 239, pp. 447-455, 2013.
- [29] Futuros Emisiones de Carbono, <https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>.
- [30] T. Bruckner, H. Chum, A. Jäger-Waldau, A. Killingtveit, L. Gutiérrez-Negrín, J. Nyboer, W. Musial, A. Verbruggen, y R. Wisser, *Annex III: Cost Table*, en: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, UK and New York, NY, USA, 2011.
- [31] S. Schlömer, T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, y R. Wisser, *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*, en: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, UK and New York, NY, USA, 2014.
- [32] Lazard, *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis*, Version 12.0, 2018.
- [33] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Power Generation Costs in 2017*, Abu Dhabi, 2018.
- [34] World Energy Council. *World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies*, 2013.
- [35] G. Oreggioni, B. Gowreesunker, S. Tassou, G. Bianchi, M. Reilly, M. Kirby, T. Toop, y M. Theodorou, *Potential for Energy Production from Farm Wastes Using Anaerobic Digestion in the UK: An Economic Comparison of Different Size Plants*. Revista Energies 2017, 10, pp.1396-1412, Septiembre de 2017.