

Producción de Biogás a Partir de Residuos Orgánicos

Hermes R. Iván^a, Seniuk A. David^{a*}, Zizak Giancarlo J.^a, Cabral Roberto J.^{a, b, c}, Berent Héctor F.^{a, b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica (LIDEE), Oberá, Misiones, Argentina.

^c Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

e-mails: hermesivan98@gmail.com, seniukdavid299@gmail.com, giancarlozizak12@gmail.com,
robert_rjc@hotmail.com, hectorberent71@gmail.com

Resumen

La producción de biogás a partir de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica representa una alternativa técnica para el aprovechamiento energético de materiales biodegradables. En este artículo se presenta el estado del arte y se describen los fundamentos del proceso biológico, haciendo hincapié en las etapas microbiológicas, los tipos de sustratos empleados (residuos agroindustriales, estiércoles y fracción orgánica domiciliaria) y los parámetros operativos que influyen directamente en el rendimiento. Se detallan los rangos de temperatura, el pH óptimo para la generación de metano, el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica diaria. Además, se presenta un esquema básico de diseño de planta, incluyendo consideraciones sobre volumen del digestor, manejo del efluente y aprovechamiento del biogás generado y por otra parte nombrar las normativas aplicadas a este tipo de energía.

Palabras Clave – Biodigestores, Biogás, Biometano, Energía Renovable, Orgánicos, Residuos.

1 Introducción

La generación de residuos orgánicos a partir de actividades urbanas, agropecuarias e industriales constituye uno de los principales retos medioambientales del siglo XXI. La disposición inadecuada de estos residuos conlleva impactos significativos, como la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y del agua, y proliferación de vectores patógenos. Frente a este contexto, la digestión anaeróbica surge como una tecnología eficaz para mitigar dichos efectos, al permitir la transformación de residuos en recursos aprovechables.

Distintos estudios, como los reunidos en *The Biogas Handbook* [1], destacan el potencial del biogás como fuente de energía renovable, subrayando su capacidad de adaptación a diferentes contextos productivos y su rol en la economía.

El objetivo de este trabajo es analizar los principios científicos y de ingeniería que sustentan la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, haciendo foco en el diseño de plantas de producción y en los factores que influyen en su eficiencia y rentabilidad. La contribución principal del artículo radica en la integración de conocimientos teóricos y prácticos para brindar una guía que permita evaluar la factibilidad de implementar este tipo de soluciones en contextos regionales.

2 Producción de Biogás por Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo mediante el cual se transforma la materia orgánica biodegradable en una mezcla gaseosa rica en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), conocida como biogás. Este proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y está impulsado

por un consorcio de microorganismos especializados llamados “Archeas” que actúan de forma secuencial a lo largo de cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Wellinger, Murphy & Baxter, 2013).

En la primera etapa, hidrólisis, los compuestos orgánicos complejos presentes en los residuos, como carbohidratos, proteínas y lípidos, son descompuestos en moléculas más simples y solubles. Las bacterias hidrolíticas liberan enzimas extracelulares como amilasas, proteasas y lipasas, que rompen estos polímeros en monómeros: azúcares simples (como glucosa), aminoácidos y ácidos grasos. Esta etapa es fundamental ya que convierte la materia orgánica insoluble en formas que pueden ser utilizadas por otros grupos microbianos en las etapas siguientes.

Durante la acidogénesis, las bacterias fermentativas transforman los productos de la hidrólisis en compuestos más pequeños, como ácidos grasos volátiles (ácido acético, propiónico, butírico), alcoholes, hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2), y otros subproductos. En esta etapa también se generan compuestos intermedios que pueden servir como sustrato para las bacterias acetogénicas. Es una fase altamente activa y produce una mezcla variada de metabolitos.

En la tercera etapa, denominada acetogénesis, los productos generados durante la acidogénesis, como los ácidos grasos de cadena más larga son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas. Esta etapa es crucial porque el acetato y el hidrógeno son los principales precursores del metano en la siguiente fase. Además, este paso depende fuertemente de la relación simbiótica entre las bacterias acetogénicas y los microorganismos metanogénicos, ya que estos últimos consumen el hidrógeno producido, manteniendo las condiciones termodinámicas necesarias para que la acetogénesis ocurra.

La última fase, metanogénesis, es llevada a cabo por un grupo especializado de arqueas llamadas metanógenas. Estas transforman principalmente el acetato y el hidrógeno con dióxido de carbono en metano (CH_4) y más CO_2 . Existen dos rutas principales de formación de metano: metanogénesis acetoclástica y metanogénesis hidrogenotrófica.

Esta etapa final es esencial no solo por la producción de biogás, sino también por estabilizar el proceso, ya que elimina los compuestos que, si se acumularan, podrían inhibir el sistema.

El proceso depende de variables como el pH, la temperatura dentro del biodigestor, la velocidad de carga orgánica (OLR) y el tiempo de retención hidráulica (TRH). Además, el control de inhibidores, como altas concentraciones de amonio, metales pesados o detergentes, es crucial para mantener la estabilidad del proceso.

3 Variables del Proceso

El proceso depende de variables como el pH, la temperatura dentro del biodigestor, la velocidad de carga orgánica (OLR) y el tiempo de retención hidráulica (TRH). Además, el control de inhibidores, como altas concentraciones de amonio, metales pesados o detergentes, es crucial para mantener la estabilidad del proceso.

3.1 Control del PH

El pH es una variable crítica en la digestión anaeróbica, ya que afecta directamente la actividad de los microorganismos, especialmente los metanogénicos. El rango óptimo de pH se encuentra entre 6,5 y 7,8. Valores por debajo de 6,5 pueden inhibir la metanogénesis, mientras que un pH por encima de 8 puede favorecer la toxicidad por amoníaco. Es fundamental realizar un control periódico del pH, tanto del afluente como del efluente, para evitar condiciones de acidosis o alcalosis que comprometan la producción de biogás.

A continuación, se presentan dos figuras que muestran distintas variables del proceso de digestión anaeróbica en dos tipos de residuos: estiércol de vacuno (Fig. 1) y estiércol porcino (Fig. 2), respectivamente. En ambas figuras se observa la variación del pH a lo largo de varias semanas. Asociada a esta variación, se registran pequeños cambios en la producción de biogás, ligeramente afectada por las fluctuaciones en los niveles de pH.

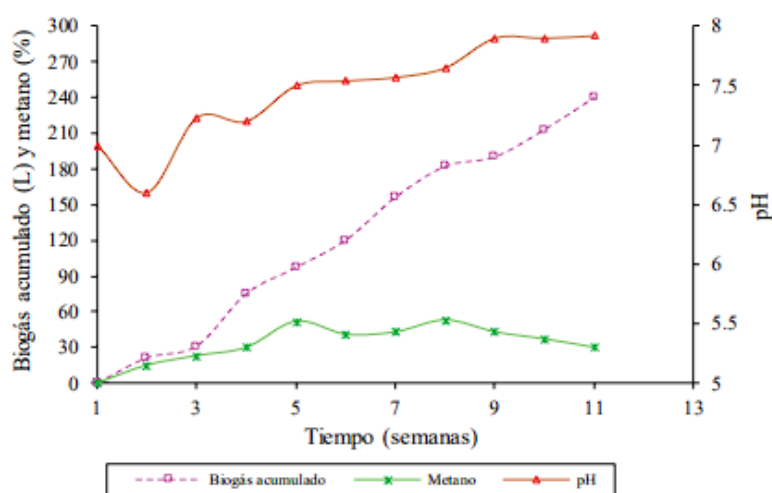


Fig. 1. Producción de biogás, metano y valores de pH durante el proceso de D.A. de estiércol de vaca. (<https://www.redalyc.org/journal/2631/263152411013/html/>)

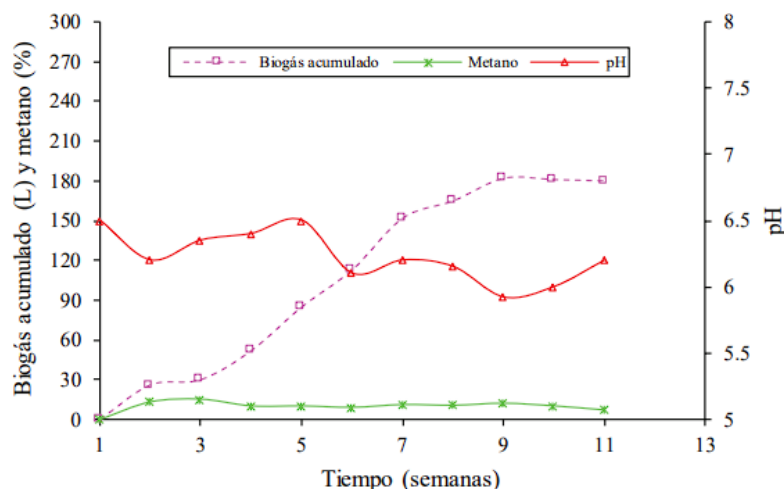


Fig. 2. Producción de biogás, metano y valores de pH durante el proceso de D.A. de estiércol de cerdo. (<https://www.redalyc.org/journal/2631/263152411013/html/>)

3.2 Control de la Temperatura

La temperatura afecta tanto la cinética de los procesos como la solubilidad de compuestos. La digestión anaeróbica puede operar en tres rangos como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1 – Temperatura del biodigestor en función del proceso.
(Fuente: adaptada de *The Biogas Handbook*)

Proceso	Temperatura en °C
Psicrófilos	10-25
Mesófilos	25-40
Termófilos	40-55

A mayor temperatura, mayor velocidad de reacción y menor tiempo de retención requerido. Sin embargo, los sistemas termofílicos son más sensibles a perturbaciones y requieren mayor inversión por necesidades de aislamiento y calefacción.

La estabilidad térmica dentro del biodigestor es esencial para mantener una población microbiana activa y constante lo que es muy importante para la generación de biogás, en la Fig. 3 se muestra como aumenta la generación de biogás en función de la temperatura.

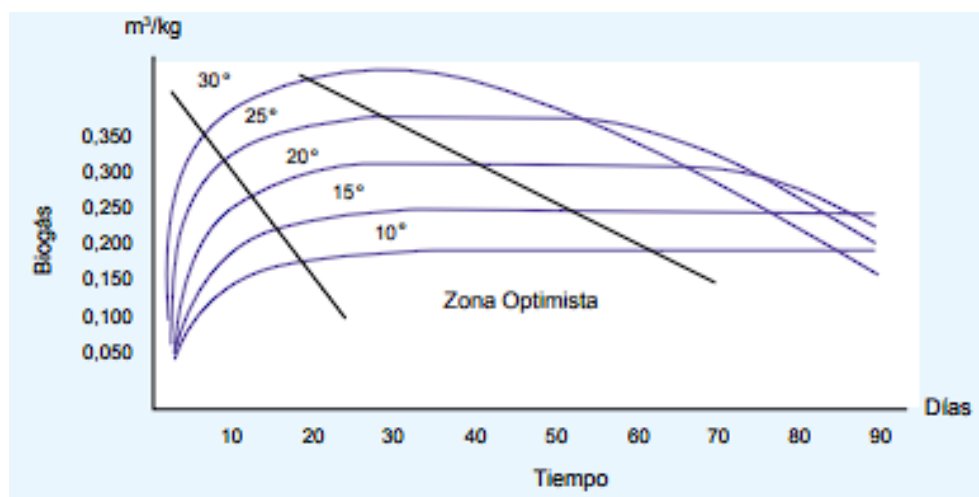


Fig. 3. Cantidad de biogás en función de la temperatura del proceso.
(Fuente: Speece, R.E. (1996) *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatments*.)

3.3 Velocidad de Carga Orgánica

La OLR representa la cantidad de materia orgánica (generalmente en kg de SV/m³·día, en donde SV representa sólidos volátiles el cual se determina mediante ensayos) que se introduce al sistema. Una OLR adecuada permite un equilibrio entre la cantidad de sustrato y la capacidad del consorcio microbiano para degradarlo. Si la OLR es demasiado alta, puede producirse acumulación de ácidos grasos volátiles y caída del pH, inhibiendo la metanogénesis. Valores bajos, por otro lado, implican mayores tiempos de retención y menor eficiencia económica. La OLR óptima depende del tipo de sustrato y debe ajustarse experimentalmente para cada instalación.

3.4 Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención hidráulica es el tiempo promedio que un sustrato permanece en el biodigestor, y se calcula con la ecuación (1).

$$TRH = \frac{Vol [m^3]}{Q_{diario} \left[\frac{m^3}{dia} \right]} \quad (1)$$

Donde:

Vol : Indica el volumen del biodigestor.

Q_{diario} : Es la carga total de excremento y agua diario.

Este parámetro está directamente vinculado a la temperatura del proceso, esto también se puede observar en Fig. 3 anteriormente mostrada. A menor temperatura, se requieren mayores TRH para lograr una digestión completa. Algunos valores típicos según el proceso se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2- Cantidad de días en función del proceso.

(Fuen-

te: adaptada de The Biogas Handbook)

Proceso	Tiempo de retención en días
Psicrófilos	50-120
Mesófilos	25-50
Termófilos	15-25

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es una variable tan relevante como la temperatura, ya que está directamente relacionada con el tamaño del biodigestor y, por lo tanto, con la dimensión del proyecto a desarrollar. Por esta razón, en distintas regiones del mundo se observan biodigestores de gran tamaño, debido a que mantener una temperatura adecuada durante el proceso requiere un cierto nivel de control térmico y una disponibilidad energética constante. La escala del biodigestor dependerá fundamentalmente de la cantidad de materia prima disponible y del uso final que se le dará al biogás. En aplicaciones domiciliarias, por ejemplo, suelen utilizarse biodigestores pequeños, capaces de abastecer de gas a una vivienda. En cambio, cuando el objetivo es la generación de energía a mayor escala, los biodigestores deben ser considerablemente más grandes.

3.5 Inhibidores

Existen numerosos compuestos que pueden afectar negativamente la digestión anaeróbica. Estos inhibidores pueden provenir de residuos industriales o de suplementos alimenticios en el caso de estiércoles. Su presencia puede bloquear rutas metabólicas específicas del consorcio microbiano. Por esta razón es de vital importancia analizar los criaderos o la fuente de la cual proviene el excremento ya que muchos de estos utilizan antibióticos u otros productos para el engorde de los animales.

4 Planta de Biogás

Una planta de biogás puede ser muy sencilla o muy compleja dependiendo de la importancia del proceso y las variables a controlar.

Principalmente, dentro de una planta de biogás se encuentra el biodigestor, el cual ocupa el mayor espacio dentro de ella, ya que su tamaño depende directamente del tiempo de retención hidráulico (TRH), como vimos en el apartado anterior. También se cuenta con piletas de ingreso para la materia prima (como excremento animal, residuos vegetales o lodos) y piletas de egreso, donde se vierte el digesto ya utilizado.

Existen varios tipos de biodigestores, como los de cúpula fija, cúpula móvil, biodigestores tubulares horizontales o verticales, tipo laguna cubierta o los UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) que son más comunes en instalaciones industriales como los que se muestran en las Fig. 4. La elección depende de factores como el tipo de residuo, el clima, la escala del proyecto y el nivel de automatización requerido.

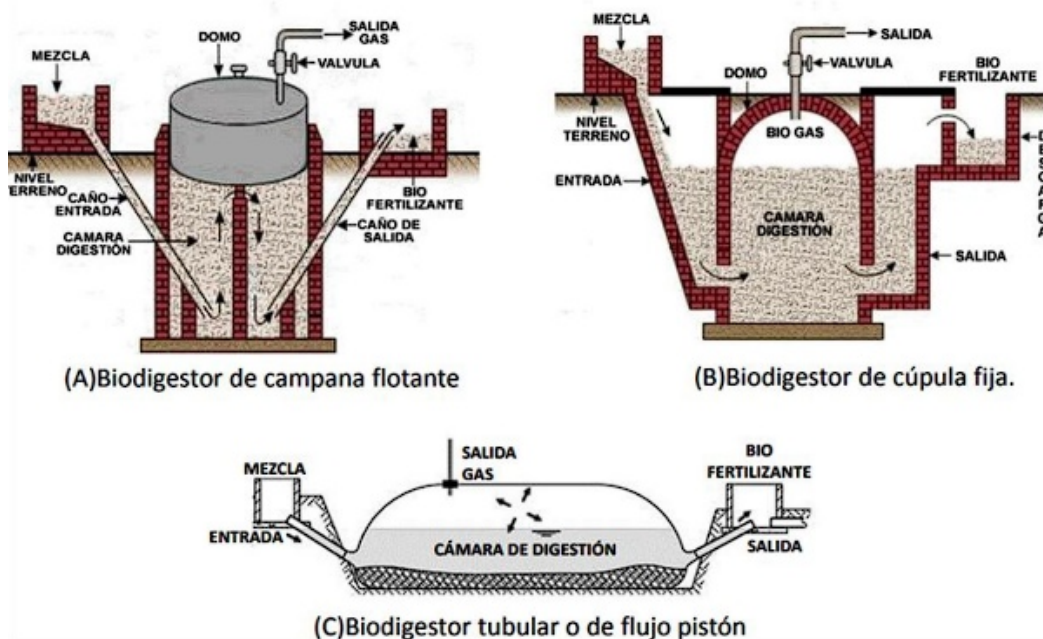


Fig. 4. Tipos de biodigestores más conocidos. (https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf)

Sea cual sea el tipo de digestor, la planta cuenta con recipientes de almacenamiento de biogás, los cuales pueden estar ubicados sobre el digestor mismo o en tanques separados. También se utilizan sistemas de enfriamiento de gas (*chillers*) y filtros de limpieza, como los de remoción de H_2S (sulfuro de hidrógeno), para evitar la corrosión en los equipos. Además, se incorporan compresores para presurizar el gas y facilitar su almacenamiento o transporte.

Por otra parte, se utilizan bombas tanto para inyectar el sustrato (como el estiércol) dentro del digestor, como para extraer el digesto que será usado como fertilizante orgánico. Según el objetivo de la planta, el biogás generado puede ser inyectado a la red de gas natural, almacenado en cilindros para uso doméstico o industrial, o utilizado directamente para la generación de energía eléctrica, mediante turbogeneradores, motores de combustión interna o incluso microturbinas.

También se incluyen sistemas de agitación (internos o externos) para evitar la formación de capas sólidas o espumas en el digestor que dificulten el proceso. Finalmente, se dispone de una serie de dispositivos de control y monitoreo, como sensores de temperatura, pH, presión, caudal y

actuadores automáticos, que permiten un seguimiento en tiempo real del funcionamiento de la planta y facilitan su operación eficiente y segura. A continuación, en la Fig. 5, se muestra un diagrama de flujo esquemático de uno de todas las posibles opciones de plantas.

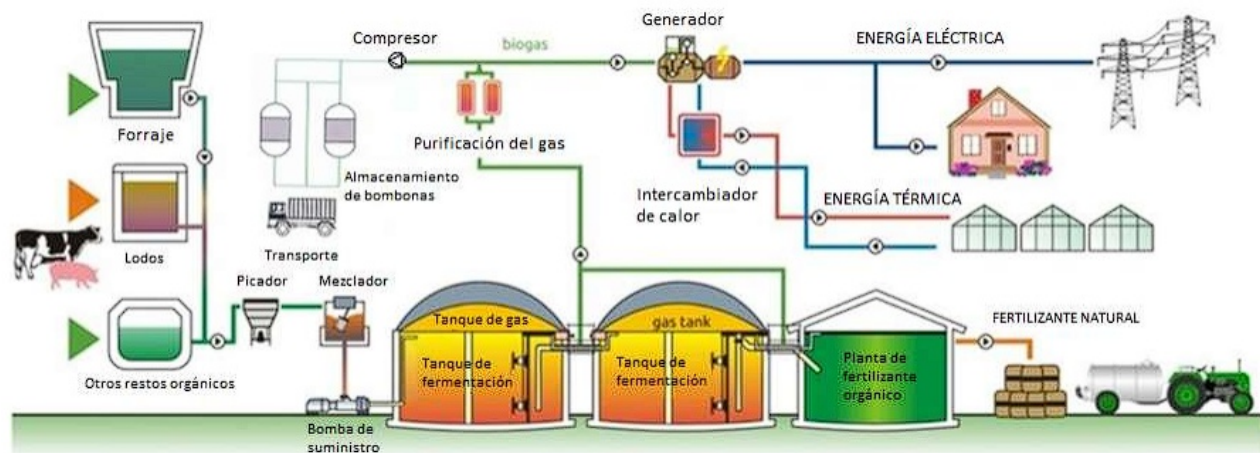


Fig. 5. Diagrama de flujo de planta de biogás.
(fuente: <https://amapex.net/como-aumentar-la-eficiencia-del-biogas/>)

5 Marco Normativo Integral

La evaluación legal del proyecto contempla un marco normativo integral que abarca cuatro ejes principales. En primer lugar, la normativa sobre biodigestores y biogás regula el diseño, instalación y operación de estas plantas, asegurando una gestión adecuada de los residuos orgánicos y el cumplimiento de los estándares ambientales y de seguridad. A nivel internacional destacan compromisos como el alcanzado en la COP26 para la reducción de emisiones de metano y la norma ISO 20675:2018, mientras que en el plano nacional se aplican leyes como la 13.660, 26.093 y 27.640, junto con su reglamentación, y en el ámbito provincial la Ley XVI-97 de Misiones fomenta las energías renovables y biocombustibles.

En cuanto a la generación de energía eléctrica y su inyección a la red, se establecen los requisitos técnicos y administrativos para la producción de electricidad a partir de biogás conforme a la Ley 15.336 y la Ley 24.065, que regulan el servicio eléctrico nacional, además de la Ley 26.190 que promueve las fuentes renovables. En Misiones, la Ley XVI-118 incorpora el régimen de balance neto, habilitando a usuarios a generar energía renovable e inyectar sus excedentes a la red.

La gestión de efluentes y la quema controlada de biogás excedente se rigen por normativas que buscan garantizar su uso seguro y ambientalmente responsable. Para el digestato, se aplica la Resolución 19/2019, que fija límites de metales pesados y patógenos, complementada por artículos del Código Alimentario Argentino relacionados con suelos, aguas y buenas prácticas agrícolas. Además, las leyes ambientales provinciales como la Ley XVI-35 (Evaluación de Impacto Ambiental) y el Decreto 2149/87 regulan los vertidos líquidos e industriales, mientras que para la

quema de biogás se aplican estándares internacionales como ISO 14064, que establecen requisitos para cuantificación y control de emisiones, junto con buenas prácticas de operación de antorchas.

Finalmente, las condiciones de higiene y seguridad laboral, regidas por la Ley 19.587, establecen medidas obligatorias para prevenir riesgos en plantas de biogás. Estas incluyen control de gases peligrosos, uso de equipos de protección personal, planes de emergencia, mantenimiento de equipos y señalización de zonas de riesgo, con el objetivo de proteger al personal y garantizar la operación segura y eficiente de las instalaciones.

6 Conclusiones

La digestión anaeróbica es una tecnología altamente útil que permite transformar residuos orgánicos en energía y fertilizantes, contribuyendo significativamente a la reducción del impacto ambiental. Su correcto funcionamiento requiere el control de variables clave como el pH, la temperatura, la carga de materia y el tiempo de retención en el biodigestor. El diseño de las plantas de biogás debe adaptarse tanto al tipo de residuo como al contexto de aplicación, siendo viable tanto en entornos domésticos como industriales. En regiones como Brasil y Europa, esta tecnología ya se implementa con resultados satisfactorios. Además, como se observa, las normativas actuales aún no son muy exigentes, lo que refleja que se trata de una tecnología en fase de expansión.

Referencias

- [1] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, Eds., *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2013.
- [2] *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*, 1ª ed., GTZ-Energía, Cochabamba, Bolivia, 2008.
- [3] *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia*, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 2018, pp. 1–93.
- [4] Edgar Esteban Bustos Barrera, “Estudio comparativo del cultivo de jitomate bajo diferentes esquemas de fertilización,” *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.8 Núm.5 30 de junio - 13 de agosto, 2017.
- [5] FAO. (2019, agosto). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Presentado en el marco del Proyecto PROBIOMASA – FAO, Secretaría de Gobierno de Agroindustria y de Energía. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/ca5082es/CA5082ES.pdf>
- [6] W. O. Jones and J. C. Uslenghi, “Diseño y cálculo de las instalaciones de un biodigestor,” Proyecto final de carrera, Depto. Ing. Electromecánica, Univ. Tecnológica Nacional, FRCU, Concepción del Uruguay, Argentina, 2012.
- [7] Ley 26.093/2006 – Régimen de Promoción de Biocombustibles, sancionada 19 Abr 2006, Boletín Oficial 12 May 2006.
- [8] Ley 15.336/1960 – Régimen de la Energía Eléctrica, sancionada 15 Sep 1960, Boletín Oficial 22 Sep 1960.
- [9] Decreto 109/2007 – Reglamentación de la Ley 26.093, Ministerio de Planificación.
- [10] Resolución SE 1296/2008 – Seguridad en plantas de biocombustibles, Secretaría de Energía, 13 Nov 2008, Boletín Oficial 18 Nov 2008.
- [11] Ley 27.640/2021 – Marco Regulatorio de Biocombustibles (vigencia hasta 2030).