



UNIVERSIDAD EAN

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LA PRODUCCIÓN
DE BIOGÁS CON ALTO POTENCIAL EN HIDRÓGENO A PARTIR DE
LACTOSUERO MEDIANTE FERMENTACIÓN OSCURA**

TUTOR:

Dr. JOHANNA KARINA

SOLANO MEZA

AUTOR:

Br. PEDRO DAVID RAMIREZ

CHIREMA

BOGOTÁ D.C.



Tabla de Contenido

1. Resumen Ejecutivo.....	3
2. Introducción.....	4
3. Objetivos.....	5
3.1. Objetivo General.....	5
3.2. Objetivos Específicos.....	5
4. Definición del Problema.....	6
5. Justificación.....	7
6. Análisis de Requerimientos.....	9
7. Marco Teórico.....	11
7.1. Lactosuero.....	11
7.2. Composición Química y Carga Orgánica.....	11
7.3. Problemática Ambiental Asociada.....	12
7.4. Degradación Biológica del Lactosuero.....	13
7.5. Ruta Metabólica de Digestión Anaerobia.....	14
7.6. Fermentación Oscura.....	17
7.7. Variables y Condiciones Operativas del Proceso.....	18
7.8. Condiciones óptimas para la fermentación oscura.....	19
7.9. Microorganismos Utilizados como Inóculo.....	20
7.10. Características del Biorreactor.....	20
7.11. Diseño y Modelación del Proceso.....	21
7.12. Reacciones Químicas Involucradas en el Proceso Fermentativo.....	21
7.13. Software Especializado en Análisis.....	23
7.14. Análisis de Ciclo de Vida.....	24
7.15. Conceptos y Metodología del ACV.....	24
7.16. Etapas del ACV.....	25
8. Análisis de Restricciones.....	26
9. Metodología para la Selección y Desarrollo de la Solución.....	28
10. Resultado.....	32
10.1 Análisis de Ciclo de Vida Aplicado.....	39
11. Análisis de Costos.....	48
12. Análisis de Viabilidad Económica.....	51
13. Conclusiones.....	52
14. Referencias.....	54



1. Resumen Ejecutivo

El presente proyecto evalúa los posibles impactos ambientales asociados con la implementación de una planta semiindustrial para la producción de biogás a partir de lactosuero mediante fermentación oscura, en una finca quesera ubicada en el municipio de Guadua, Cundinamarca.

Como punto de partida, se analizaron los datos obtenidos por el semillero de investigación SIIPAR – Desarrollo de Productos de la Universidad EAN, en los cuales se evaluaron distintas combinaciones de sustrato/inóculo y condiciones operativas a escala de laboratorio. Estos resultados sirvieron como base técnica para proyectar el diseño de la planta semiindustrial.

Una vez identificadas las relaciones óptimas para la producción de biogás, se propuso una configuración a escala semiindustrial y se procedió a evaluar sus posibles impactos ambientales mediante la técnica de Análisis de Ciclo de Vida , utilizando la herramienta computacional SimaPro.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se formularon recomendaciones y conclusiones orientadas a mitigar los impactos identificados. Este estudio pretende servir como una guía de referencia para futuras investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de residuos agroindustriales, contribuyendo así a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.



2. Introducción:

La industria quesera en Colombia representa un sector productivo importante en el ámbito agroindustrial, pero también genera una significativa cantidad de residuos líquidos y sólidos que, en muchos casos, no reciben un manejo adecuado, uno de los subproductos más relevantes y frecuentemente subvalorados es el lactosuero.

Como se observó a principios del corriente año, en el cual se detectaron altas concentraciones de lactosuero en productos que comercializaban algunas marcas como leche, esta práctica no solo compromete la calidad nutricional del producto final, sino que representa una forma de competencia desleal y un riesgo para la salud pública, al ofrecer un alimento que no cumple con los estándares regulatorios.

Con el fin de valorizar el lactosuero en una pequeña quesera que procesa alrededor de 160 cántaras de leche al día para la producción de quesos frescos y otros productos derivados lácteos, se planteó una miniplanta de producción de biogás con alto contenido de biohidrógeno, con el objetivo de generar una mayor cantidad de energía. Sin embargo, la investigación se centra en los posibles impactos ambientales que puedan surgir con la implementación de este proyecto productivo.



3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales asociados a la generación de biogás con alto potencial en biohidrógeno, a partir de lactosuero mediante el proceso de fermentación oscura empleando la metodología de análisis de ciclo de vida.

3.2. Objetivos específicos

- Análisis de datos recolectados de investigaciones previas, con el fin de estimar rendimientos y combinaciones adecuadas.
- Diseñar un sistema de producción de biogás adaptado a una finca productora de queso, utilizando la combinación con el mejor rendimiento obtenido en el análisis de datos.
- Evaluar los impactos ambientales asociados a la producción de biohidrógeno a partir de
- lactosuero, mediante un análisis de ciclo de vida utilizando el software SimaPro.



4. Definición del problema:

La industria quesera en Colombia genera grandes volúmenes de lactosuero como subproducto del proceso de fabricación de queso representando entre el 85% y el 90% del volumen total de leche utilizada (González-Siso, 2017), según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en 2022 la producción de queso en Colombia alcanzó 1.084 millones de kilogramos lo que sugiere una generación de aproximadamente 9.756 millones de litros de lactosuero.

En Bogotá la industria quesera genera aproximadamente 3.684.000 litros de lactosuero al día (DANE, 2022), lo que representa un desafío ambiental significativo debido a su alta carga orgánica, con valores de Demanda Biológica de Oxígeno de hasta 35.000 mg/L y Demanda Química de Oxígeno de 60.000 mg/L (Gutiérrez et al., 2022). Su disposición inadecuada en cuerpos de agua y suelos puede provocar eutrofización, alteraciones en los ecosistemas acuáticos y problemas de contaminación en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Además, ante la creciente crisis del gas natural en Colombia, provocada por el agotamiento de las reservas y la demanda creciente la generación de biogás se presenta como una opción prometedora para diversificar la matriz energética del país.



Frente a esta problemática, surge el interrogante: ¿puede el biogás rico en biohidrógeno o hidrógeno verde producido mediante fermentación oscura del lactosuero representar una alternativa viable y sostenible, en el contexto de las tecnologías emergentes orientadas hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la transición energética?

Por lo tanto, es necesario analizar la viabilidad de la producción de hidrógeno a partir del lactosuero mediante fermentación oscura y determinar los impactos ambientales asociados a través de un Análisis de Ciclo de Vida. Esto permitirá establecer si esta tecnología representa una opción sostenible para la gestión de residuos de la industria láctea en Bogotá y su contribución a la transición hacia energías renovables.



5. Justificación

La situación actual en Colombia en el ámbito energético es alarmante, ya que cada día disponemos de menos reservas de gas natural y crece la demanda de este producto este trabajo se alinea con la ruta energética del país, convirtiendo a la fermentación oscura un proceso altamente viable para contribuir a los objetivos de transformación energética, con la producción de biogás rico en hidrogeno, un componente de alto poder energético y potencial para el desarrollo de sistemas de energía sostenible (Das y Veziroglu, 2001).

La fermentación oscura promueve el aprovechamiento de un subproducto altamente contaminante de la industria agroindustrial, como lo es el lactosuero, generado en grandes volúmenes durante la producción de queso. Sin embargo, el impacto ambiental de este proceso aún no ha sido ampliamente evaluado en el contexto de Bogotá, lo que genera incertidumbre sobre su viabilidad a gran escala.

Por ello, el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta clave para evaluar los impactos ambientales asociados a la fermentación oscura en la producción de biogás. Estudio necesario porque no solo permite determinar los puntos críticos de impacto ambiental en la producción de biogás, sino también determinar si no estamos sustituyendo una problemática por otra, permitiendo la integración dentro de un modelo de economía circular para Bogotá.



Además, sirve como herramienta para la toma de decisiones en políticas de gestión de residuos y transición energética, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles y disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero en la ciudad



6. Análisis de requerimientos:

El análisis de requerimientos constituye una fase fundamental para el desarrollo exitoso del proyecto, enfocado en el análisis del ciclo de vida del proceso de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura, utilizando como sustrato principal el lactosuero. Estudio realizado por el semillero de investigación SIIPAR - Desarrollo de Productos de la Universidad EAN, con el objetivo principal de proyectar el proceso desde escala laboratorio hacia una implementación industrial.

Este proceso contribuye a resolver problemáticas ambientales asociadas al manejo del lactosuero, mitigando su impacto negativo mediante una solución sostenible que a su vez genera un recurso energético renovable. Este propósito se alinea directamente con objetivos globales de sostenibilidad, especialmente con la reducción de impactos ambientales negativos y la promoción de energías limpias (ODS 7 y ODS 12).

Se llevará a cabo la estimación técnica de características esenciales del proceso. Para llevar a cabo estos análisis, se utilizarán herramientas especializadas como SimaPro, basada en bases de datos confiables y metodologías reconocidas internacionalmente, lo que permitirá asegurar una estimación precisa y una adecuada proyección del proceso a escala industrial, en el ámbito empresarial, si se desea realizar un análisis de ciclo de vida con el fin de implementar normas de estandarización en los procesos y conocer el impacto real de sus operaciones, es fundamental contar con equipos de cómputo adecuados.



Como mínimo, se requiere un procesador de tercera generación y una memoria RAM de al menos 4 GB para garantizar el funcionamiento correcto del software. Además, es necesario adquirir las licencias correspondientes de los programas a utilizar, para este tipo de análisis, el uso de SimaPro es suficiente, siempre que se cuente con un inventario bien estructurado y respaldado por balances de materia y energía. Aunque herramientas como Aspen Plus pueden complementar ciertos estudios, no son imprescindibles para el ACV.



7. Marco Teórico

7.1. Lactosuero

La industria quesera de Colombia genera grandes cantidades de lactosuero, subproducto que representa aproximadamente el 85-90 % del volumen total de la leche procesada y conservando cerca del 55 % de los nutrientes originales, incluyendo carbohidratos, proteínas solubles, minerales y vitaminas (Adolfo y Huertas, 2008). Debido a su elevada carga orgánica, con altos niveles de lactosa, proteínas y materia nitrogenada, su vertido sin tratamiento adecuado lo convierte en un residuo altamente contaminante con un fuerte impacto ambiental (Komesu et al., 2017).

7.2. Composición química y carga orgánica

Existen dos tipos principales de lactosuero: el ácido y el dulce, que se diferencian principalmente por el método empleado en la coagulación de la leche y, por ende, en su composición química resultante. Esta composición puede variar significativamente dependiendo de la fuente de leche utilizada (cabra, oveja o vaca), tal como se observa en la Tabla 1, donde se evidencian claras diferencias en los contenidos de humedad, sólidos totales, lactosa, proteínas, grasas y en los valores de pH.



Generalmente, la lactosa constituye el principal componente nutritivo del lactosuero, con concentraciones promedio en torno al 5,2 %; seguida por proteínas, cuya concentración media es aproximadamente del 2,9 % (p/v). El lactosuero dulce se obtiene cuando la coagulación de la leche se realiza mediante el uso de enzimas, mientras que el lactosuero ácido resulta del uso de ácidos orgánicos como agentes coagulantes (Adolfo y Huertas, 2008).

Tabla 1.

Composición química del lactosuero obtenido de diferentes fuentes de leche, tanto ácido como dulce.

Table 1. Chemical composition of cheese whey from different milk sources as well as acid and sweet whey.

Component	Type of Milk			
	Goat [19]	Sheep [20]	Cow [21]	Cow [22]
Moisture (%)	93.5	92.3	94.9	93.6
Total solids (%)	6.4	7.6	5.0	6.4
Lactose (%)	4.1	5.7	4.6	6.3
Protein (g/L)	1.2	1.0	2.5	6.8
Fat (g/L)	0.4	nd	4.9	1.8
Ash (%)	0.6	nd	0.3	0.6
pH	4.5	6.16	4.6	6.2

nd: not determined.

Nota. Fuente: Osorio-González et al., 2022

7.3. Problemática ambiental asociada

Debido a su alta carga orgánica, la disposición del lactosuero sin tratamiento adecuado genera graves consecuencias ambientales, principalmente asociadas con su elevado contenido de sólidos solubles y nutrientes como nitrógeno y fósforo.



Estos compuestos al ingresar en cuerpos de agua incrementan considerablemente la demanda bioquímica y química de oxígeno, produciendo fenómenos de eutrofización, pérdida de biodiversidad acuática, y degradación general de la calidad del agua (Prazeres et al., 2012).

Esta problemática ambiental, sumada al gran volumen de lactosuero generado por la creciente demanda de productos lácteos a nivel mundial, ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles que permitan valorizar este subproducto industrial. Una de las estrategias más prometedoras es la fermentación anaerobia, particularmente la fermentación oscura, la cual permite transformar los carbohidratos presentes en el lactosuero en biohidrógeno, una fuente energética limpia y renovable (Osorio-González et al., 2022). Esta solución tecnológica no solo reduciría el impacto ambiental, sino que también contribuiría al cumplimiento de los objetivos globales de sostenibilidad y economía circular.

7.4. Degradación biológica del lactosuero

El lactosuero es una matriz orgánica con una alta demanda biológica de oxígeno de 3,5 kg y una demanda química de Oxígeno de 6,8 kg por cada 100 kg de lactosuero líquido (Muñi et al., 2005 citado en Adolfo y Huertas, (2008), esto debe a la gran cantidad de nutrientes hidrosolubles presentes en el lactosuero.



7.5. Ruta metabólica de digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que se desarrolla mediante una serie de etapas fundamentales en ausencia total de oxígeno, llevado a cabo en sistemas cerrados o biodigestores. En estos sistemas, diversas comunidades microbianas especializadas degradan materia orgánica.

La composición específica del biogás varía considerablemente dependiendo del tipo de sustrato utilizado y las condiciones operativas del proceso (Cuba et al., s.f.), el principal producto de la digestión anaerobia es el biogás, que es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, junto con pequeñas concentraciones de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno.

La digestión anaerobia comprende cuatro grandes etapas, durante la etapa inicial, denominada hidrólisis, se produce la conversión de compuestos orgánicos complejos en moléculas más simples como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos.

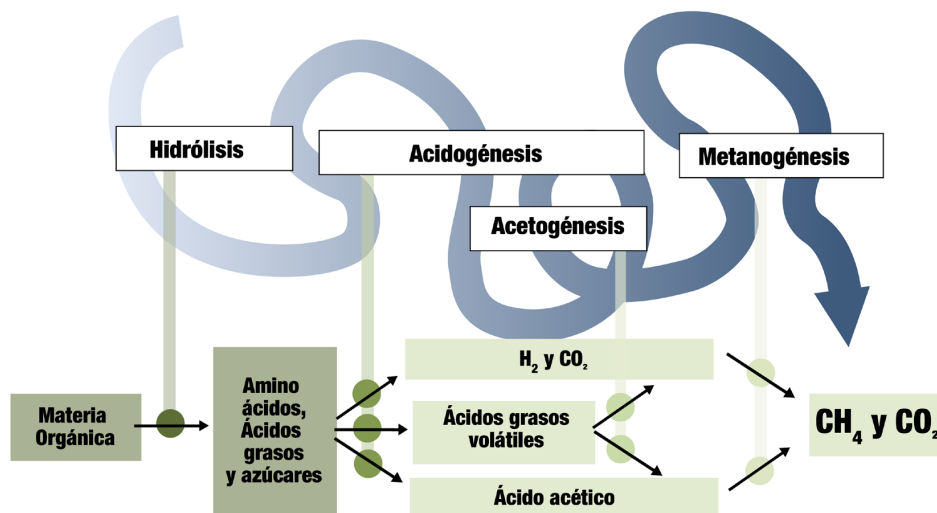
Esta etapa varía significativamente dependiendo del tipo de sustrato, ya que algunos materiales, como el pasto, son difíciles de hidrolizar debido a su elevado contenido de lignina. En contraste, otras materias orgánicas como las aguas mieles del café o el lactosuero presentan una hidrólisis más rápida y eficiente, lo que puede generar desequilibrios posteriores en el proceso anaerobio (Herrero J, 2019)



La segunda etapa es la acidogénesis, donde los productos generados durante la hidrólisis (azúcares, ácidos grasos y aminoácidos) son convertidos en ácidos grasos volátiles, hidrógeno molecular y dióxido de carbono (Herrero J, 2019). En la tercera etapa, conocida como acetogénesis, una parte de estos ácidos grasos volátiles se convierte adicionalmente en ácido acético, H_2 y CO_2 . Con esto, la producción de ácido acético, H_2 y CO_2 puede ocurrir directamente desde la acidogénesis o a través de la acetogénesis (Herrero J, 2019).

Figura 1.

Ruta metabólica de la digestión anaeróbica



Nota. Fuente: (Herrero J, 2019).

Finalmente, en la cuarta etapa, denominada metanogénesis, las bacterias metanógenas utilizan el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono generados en etapas anteriores para producir metano y dióxido de carbono (Herrero J, 2019).



Gujer y Zehnder (1983) identificaron seis procesos fundamentales en un digestor anaerobio; posteriormente, con la incorporación de la homoacetogénesis como subproceso independiente, actualmente se reconocen siete subprocesos claramente definidos. (Seghezzo,2004).

Tabla 2.

Subprocesos en la digestión anaerobia de materiales poliméricos orgánicos.

1.	Hidrólisis de materiales orgánicos complejos y particulados (proteínas, carbohidratos y lípidos).
2.	Fermentación de aminoácidos y azúcares.
3.	Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes.
4.	Oxidación anaerobia de productos intermedios, como ácidos grasos de cadena corta (excepto acetato).
5.	Producción de acetato a partir de dióxido de carbono e hidrógeno (homoacetogénesis).
6.	Conversión de acetato a metano (metanogénesis).
7.	Producción de metano mediante la reducción de dióxido de carbono con hidrógeno.

Nota. Fuente: (Seghezzo,2004)



7.6. Fermentación oscura

la fermentación oscura es una tecnología clave para la producción de hidrógeno a partir de residuos de cultivos, desechos de ganado y desechos de alimentos. (Guo et al., 2010). La fermentación oscura es un proceso donde uno de los productos principales es el hidrogeno, para el cual se requiere que la digestión se mantenga en estado de acidogénesis.

Los sustratos a emplear no solo deben ser abundantes y fácilmente disponibles, sino también económicos y altamente biodegradables. Los desechos agrícolas y alimentarios cumplen con todos estos requisitos (Guo et al., 2010). Colombia al ser un país con una fuerte actividad agrícola y ganadera, presenta un alto potencial para aprovechar estos residuos como materia prima en procesos de valorización sostenible.

En la fermentación oscura, frecuentemente se requieren pasos preliminares de tratamiento para mejorar la hidrólisis y optimizar la producción de biohidrógeno. Uno de estos pasos habituales consiste en aplicar un pretratamiento térmico, cuyo objetivo es eliminar o reducir la actividad de los microorganismos metalogénicos en el consorcio microbiano.

Al limitar la metanogénesis mediante un tratamiento previo, se incrementa considerablemente el rendimiento de hidrógeno gaseoso, ya que se evita el consumo competitivo del hidrógeno por parte de los microorganismos metanogénicos (Guo et al., 2010).



Este tratamiento, conocido como choque térmico, actúa sobre el pool microbiano encargado de la degradación del sustrato, inhibiendo selectivamente las bacterias productoras de metano y favoreciendo así la producción de biohidrógeno.

7.7. Variables y condiciones operativas del proceso

La caracterización adecuada del sustrato es fundamental para asegurar la eficiencia del proceso. Entre los parámetros más importantes se encuentran los sólidos totales, los sólidos volátiles y el pH, los cuales determinan en gran medida la estabilidad y rendimiento del biodigestor (Herrero, 2019).

Según Nath y Das (2004), el lactosuero y, específicamente, el desproteínizado, presenta limitaciones significativas debido a su bajo contenido de nitrógeno orgánico. Este nutriente es esencial para el crecimiento de numerosos microorganismos involucrados en la digestión anaerobia, requiriendo en ocasiones suplementación externa para evitar la inhibición o detención del proceso.



7.8. Condiciones óptimas para la fermentación oscura

Es preferible que el estado de agregación del sustrato utilizado en la digestión anaerobia sea líquido, ya que facilita la homogeneización, la distribución uniforme dentro del reactor y mejora el contacto entre los microorganismos y el material orgánico, incrementando la eficiencia del proceso. Según Deublein y Steinhauser (2011), en caso de emplearse sustratos sólidos, estos deben poseer un tamaño de partícula suficientemente pequeño para aumentar el área superficial disponible para la degradación biológica, optimizando así la actividad microbiana.

Los sólidos totales y, en particular, los sólidos volátiles, son parámetros fundamentales en la evaluación del potencial de degradación de los sustratos. Los sólidos volátiles representan la fracción orgánica susceptible de ser transformada biológicamente durante el proceso anaerobio y suelen expresarse como porcentaje de los sólidos totales. Un elevado contenido de sólidos volátiles generalmente indica un mayor potencial de producción de biogás, dado que reflejan la cantidad efectiva de materia orgánica disponible para la digestión anaerobia (Ward et al., 2008), otros factores críticos como el pH, la alcalinidad y la relación carbono/nitrógeno influyen significativamente en la estabilidad y rendimiento del proceso anaerobio (Herrero J, 2019).



7.9. Microorganismos utilizados como inóculo

Se han explorado una amplia gama de fuentes de inoculación a partir de consorcios microbianos mixtos provenientes de sustratos como lodos anaerobios de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, en la fermentación oscura para producción de biohidrógeno, la selección adecuada del inóculo microbiano es determinante para el rendimiento del proceso. Aunque numerosos estudios han investigado el uso de cultivos puros de bacterias como *Bacillus coagulans*, *Thermoanaerobacterium* spp., *Enterobacter aerogenes* y *Clostridium butyricum*, existe poca literatura relacionada con la caracterización detallada de cultivos mixtos (Guo et al., 2010)

Estudios específicos indican que los lodos provenientes de digestores anaerobios de granjas lecheras presentan un alto potencial de producción de hidrógeno al tratar desechos ganaderos, demostrando la importancia de la aclimatación previa del inóculo para mejorar la eficiencia y estabilidad del proceso fermentativo (Guo et al., 2010).

7.10. Características del Biorreactor

Para la producción eficiente de biohidrógeno mediante fermentación oscura, el diseño y la operación del biorreactor son aspectos clave que afectan significativamente el rendimiento del proceso. Los reactores discontinuos o por lotes son ampliamente utilizados a nivel de laboratorio debido a su sencillez operativa, flexibilidad y facilidad para evaluar el potencial de generación de hidrógenos de distintos sustratos orgánicos (Guo et al., 2010).



No obstante, desde un punto de vista industrial, los reactores de operación continua resultan más convenientes debido a aspectos prácticos y económicos relacionados con la gestión de residuos y la optimización del proceso productivo. Dentro de esta categoría, los reactores de tanque agitado continuo son empleados en estudios experimentales debido a su capacidad para asegurar una buena homogeneización del sustrato, control efectivo de variables críticas como temperatura y pH, así como facilitar una distribución uniforme del consorcio microbiano (Guo et al., 2010).

7.11. Diseño y modelación del proceso

Esta sección aborda los aspectos técnicos fundamentales relacionados con el diseño, modelación y simulación computacional del proceso de producción de biogás rico en hidrogeno verde mediante fermentación oscura del lactosuero, enfocándose en su potencial escalado a nivel industrial.

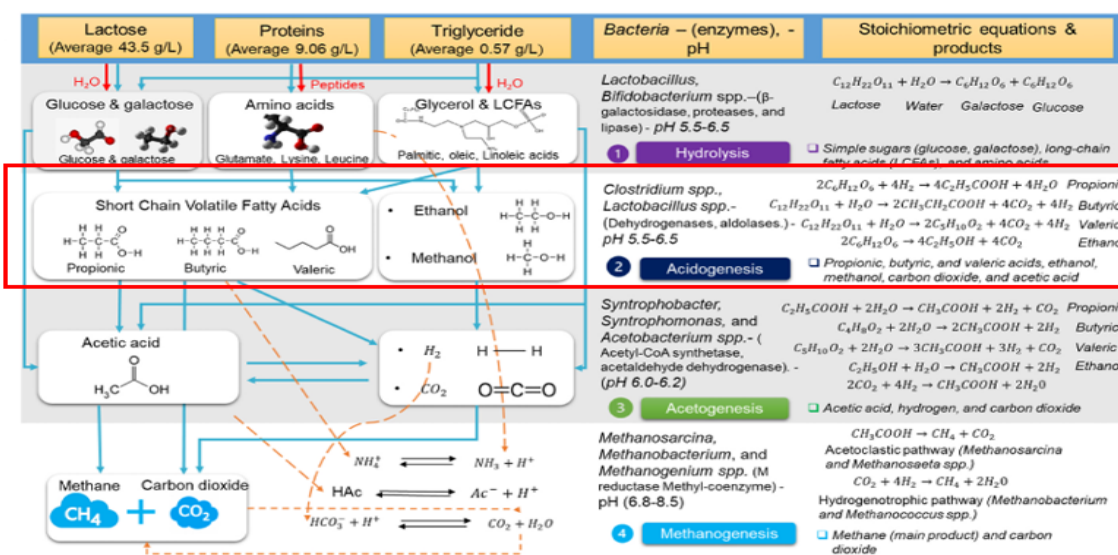
7.12. Reacciones químicas involucradas en el proceso fermentativo

Durante la fermentación oscura del lactosuero, se llevan a cabo diversas reacciones químicas fundamentales. Inicialmente, ocurre la hidrólisis de la lactosa a glucosa y galactosa mediante la acción de enzimas microbianas. Posteriormente, estos monosacáridos son convertidos mediante vías fermentativas acidogénicas en ácidos grasos volátiles, hidrógeno molecular y dióxido de carbono.



Figura 3.

Reacciones químicas y biológicas en la digestión anaeróbica



Nota. Fuente: Tugume et al., 2025

para alcanzar un rendimiento óptimo en el proceso de fermentación oscura, es esencial mantener condiciones predominantemente acidogénicas, esto se ilustra claramente en la Figura 3, específicamente en el recuadro rojo, que representa la fase de acidogénesis. En esta etapa se evidencia que los principales productos generados son hidrógeno molecular y dióxido de carbono, además de diversos ácidos grasos volátiles de cadena corta, entre los cuales destacan principalmente el ácido propiónico, butírico y acético (Tchobanoglous et al., 2014; Guo et al., 2010).



7.13. Software especializado en análisis

El avance tecnológico ha permitido facilitar y mejorar el análisis ambiental de procesos productivos mediante herramientas especializadas como SimaPro. Este software, ampliamente reconocido por su trayectoria, está enfocado en el análisis de ciclo de vida y permite medir los impactos ambientales generados a lo largo de todas las etapas del sistema, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de residuos.

Con el tiempo, ha evolucionado para satisfacer las necesidades de escalabilidad e integración en diferentes industrias. Ante la creciente demanda de metodologías confiables para evaluar el impacto ambiental de productos y procesos industriales, SimaPro es una herramienta clave, facilitando el análisis de múltiples variables ambientales mediante métodos ampliamente adoptados y promoviendo enfoques innovadores (Pré Sustainability, 2023). Su implementación permite a las empresas y profesionales tomar decisiones informadas en función de criterios ambientales, económicos y de sostenibilidad.

Este software permite cuantificar y comparar los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o proceso, consultando las bases de datos desde la extracción de materias primas hasta la gestión de residuos. Además, cuenta con una base de datos extensa que abarca una amplia variedad de materiales, productos y procesos industriales, como Ecoinvent, Agri-footprint, ELCD (European Reference Life Cycle Database), Industry data 2.0, entre otras, lo que facilita la identificación de puntos críticos y oportunidades de mejora ambiental dentro del sistema productivo (Pré Sustainability, 2020).



7.14. Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta metodológica ampliamente utilizada para evaluar integralmente los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. Su aplicación permite identificar de manera precisa aquellos puntos críticos o etapas del proceso que generan mayores impactos ambientales, facilitando la toma de decisiones estratégicas orientadas a la sostenibilidad.

7.15. Conceptos y metodología del ACV

La creciente conciencia sobre la importancia de la protección ambiental y los impactos asociados a los productos, en su fabricación y consumo, impulsa el desarrollo de metodologías que evalúe y mitigue estos efectos. Una de las herramientas más utilizadas en este contexto es el Análisis de Ciclo de Vida, técnica estandarizada que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados al proceso (ISO, 2006).

la Norma Internacional ISO 14044, desarrollada por el Comité Técnico ISO/TC 207 sobre Gestión Ambiental y su Subcomité SC 5, Análisis del Ciclo de Vida, establece los principios, requisitos y directrices para la realización de estudios de ACV, asegurando la uniformidad y validez científica en la evaluación de impactos ambientales. Además, la ISO 14044:2006, junto con la ISO 14040:2006, reemplazó versiones anteriores de las normas ISO, consolidando y actualizando los criterios metodológicos para la aplicación del ACV en diversos sectores (ISO, 2006).



7.16. Etapas del ACV

La norma ISO 14044 (2006) establece un marco metodológico riguroso compuesto por cuatro fases fundamentales que deben seguirse para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida. Estas fases son: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto y análisis de interpretación las cuales, permiten realizar una evaluación integral, sistemática y estructurada de los impactos ambientales asociados a un producto, proceso o servicio. Este enfoque considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas, pasando por la producción, distribución y uso, hasta la disposición final, asegurando así una visión holística y basada en evidencia del desempeño ambiental.

En la fase inicial Definición del objetivo y alcance se establece el propósito del estudio, los límites del sistema y la unidad funcional utilizada para la evaluación. Se define el alcance del análisis, considerando las etapas del ciclo de vida incluidas, la profundidad del estudio y los criterios para la recopilación y análisis de datos. Esta fase es crucial para garantizar la coherencia y relevancia de los resultados obtenidos (ISO, 2006).

Análisis del Inventario del Ciclo de Vida representa la segunda fase del ACV y consiste en la recopilación y cuantificación de los flujos de entrada y salida del sistema evaluado. Incluye el consumo de y las emisiones generadas, proporcionando una base de datos detallada para la evaluación de impactos ambientales (ISO, 2006).



Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida En esta etapa se analizan y clasifican los impactos ambientales potenciales derivados de los datos del inventario. Se utilizan metodologías estandarizadas para la caracterización de los efectos ambientales, considerando categorías como cambio climático, eutrofización, acidificación, toxicidad y agotamiento de recursos. Esta fase permite interpretar la magnitud y relevancia de los impactos ambientales asociados al sistema en estudio (ISO, 2006).

La interpretación de resultados es la fase final del ACV, la cual consiste en la interpretación y análisis de los resultados obtenidos en las etapas anteriores. Se identifican los principales puntos críticos del sistema evaluado, se establecen recomendaciones para la mejora del desempeño ambiental y se proporciona información clave para la toma de decisiones (ISO, 2006).



8. Análisis de restricciones

Siendo el análisis de ciclo de vida una herramienta ingenieril orientada a la identificación de impactos ambientales, su aplicación también conlleva ciertas limitaciones metodológicas. El análisis de restricciones dentro de este, permite identificar los límites técnicos, económicos, normativos y ambientales, considerar estas restricciones es esencial para garantizar que las soluciones sean ambientalmente sostenibles, realistas, contextualizadas y viables en su implementación.

- Contexto ambiental: Al tratarse de una tecnología emergente, existe una carencia de información sectorizada en Colombia, especialmente en Bogotá, que es la región objeto de estudio. Esta limitación dificulta la obtención de datos ambientales locales en las bases de datos disponibles, lo cual representa un reto para complementar adecuadamente el análisis de ciclo de vida.
- Contexto técnico: la falta de infraestructura especializada y el acceso restringido a bases de datos, no todas las empresas u organizaciones cuentan con las herramientas necesarias ni con licencias para softwares especializados. En este estudio, se emplea el software SimaPro, que permite realizar aproximaciones confiables a partir de bases de datos internacionales.



- Contexto Económico: Los softwares especializados utilizados para realizar análisis de ciclo de vida, requieren licencias de uso que representan una inversión significativa. Este factor puede constituir una restricción económica importante, especialmente para pequeñas y medianas empresas que deseen implementar este tipo de análisis con el fin de identificar los impactos ambientales de sus procesos.
- Contexto normativo: El Análisis de Ciclo de Vida no es una práctica obligatoria en Colombia de forma general. Sin embargo, para aquellas empresas que deseen obtener certificaciones ambientales o implementar sistemas de eco etiquetado, lo que se convierte en un requisito fundamental. Para ello, deben aplicar las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044, las cuales establecen la metodología, principios y requisitos necesarios para llevar a cabo este tipo de análisis de manera estandarizada y verificable.



9. Metodología para la selección y desarrollo de la solución

Para la selección de la metodología, se descartaron enfoques que no fueran viables en la práctica, especialmente aquellos relacionados con productos o procesos sobre los cuales no existe información suficiente o cuyo acceso está restringido por ser de uso exclusivo. Por esta razón, el estudio se concentró en la fermentación oscura del lactosuero, un proceso que ha demostrado ser técnicamente factible y cuenta con respaldo experimental, lo que lo posiciona como una alternativa viable para la obtención de biogás rico en hidrogeno.

El proceso se dividió en dos fases principales: la fase análisis de datos, orientada a identificar la mejor combinación de lactosuero e inóculo con respecto a la producción de biogás y al contenido de biohidrógeno que permite plantear un proceso a escala semiindustrial, así como también, una segunda fase centrada en la evaluación ambiental mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

En la primera fase, se recolectaron datos de cuatro combinaciones experimentales, las cuales arrojaron los valores más representativos de la investigación. Estos estudios advierten que cargas orgánicas elevadas pueden inhibir el proceso debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles, lo cual afecta negativamente la producción de biohidrógeno. Las combinaciones evaluadas variaron en cuanto a la relación sustrato/inóculo como se muestra en la tabla 3. Los ensayos se realizaron por triplicado bajo condiciones controladas de laboratorio.



Tabla 3.

composiciones iniciales de las muestras experimentales

COMBINACIÓN	TEMPERATURA (°C)	CARGA ORGÁNICA INICIAL GSV/L	RELACIÓN SUSTRATO/INOCULO (S/X)
1	30	10	4
3	30	20	4
5	30	15	3
7	30	15	5

Nota. Fuente: Autoría propia

Para esta etapa del proceso se tomaron datos de la investigación realizada por el semillero SIIPAR – Desarrollo de Productos de la Universidad EAN, con el fin de validar las premisas metodológicas, se recopilaron datos relacionados con los rendimientos de producción, así como las condiciones de fermentación empleadas, tales como la temperatura, el pH y otros parámetros relevantes. También se identificaron los productos generados a partir del proceso, además del biohidrógeno.

Para abordar el Análisis de Ciclo de Vida de la producción de biohidrógeno a partir de lactosuero vía fermentación oscura, se definió una metodología rigurosa y fundamentada en estándares internacionales ISO 14040 y 14044. Esta metodología se apoyó en una herramienta especializada como lo es el software SimaPro, con el fin de modelar un posible escalado industrial del proceso de forma eficiente.



Lo que genera la confianza suficiente para aceptar el modelo, adicionalmente, da un enfoque general al proceso propuesto permitiendo una comparación con trabajos previos en el mismo campo de investigación, y asegurar que nuestra metodología siguiera prácticas aceptadas por la comunidad académica y profesional.

Evaluación de opciones metodológicas posibles: Antes de definir la metodología a emplear, se estudiaron diversas alternativas en cuanto a herramientas tecnológicas, orientaciones del modelado y viabilidad económica del proceso, para garantizar una elección con base comparativa sólida.

En cuanto al software, se consideró la posibilidad de realizar el análisis de ciclo de vida ACV de forma manual, mediante la consulta individual de las bases de datos correspondientes a los impactos ambientales de cada etapa del proceso. Sin embargo, esta opción implicaba un tratamiento estadístico más complejo, con un alto riesgo de sesgos en la información y acumulación de errores en los cálculos, lo cual podría afectar la precisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Por el contrario, el uso de herramientas especializadas en análisis de ciclo de vida, como Easetech, OpenLCA o SimaPro, representa una alternativa más eficiente y confiable. Dado que un ACV implica una gran cantidad de flujos de materia y energía, así como cálculos complejos.



Entre las opciones evaluadas, SimaPro presentó ventajas significativas, principalmente por ser la herramienta disponible a través de la licencia académica proporcionada por la universidad, destacando su interfaz intuitiva y por la solidez de su entorno de trabajo, así como por su capacidad para editar e integrar bases de datos externas, la disponibilidad de múltiples métodos de evaluación de impacto ambiental y la trazabilidad de resultados.



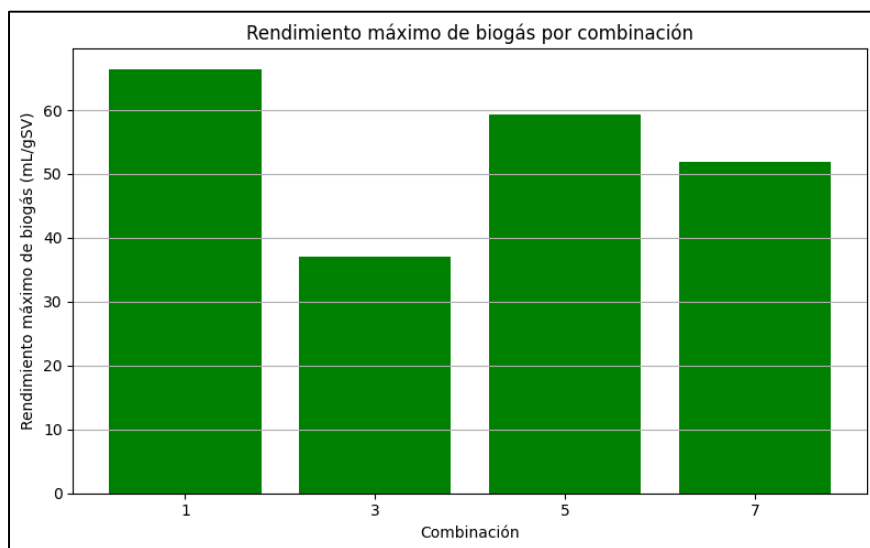
10. Resultados

Para identificar los rendimientos se tomo como base la investigación realizada por el semillero SIIPAR – desarrollo de productos de la universidad EAN, datos a los cuales se le realizo un tratamiento estadístico, arrojando resultados de gran interés para la investigación pertinente.

Tal como se presenta en el Gráfico 1, la combinación 1 mostró el mayor rendimiento en términos de volumen específico de biogás producido. Este resultado es consistente con lo reportado en la literatura, donde se destaca que las mejores tasas de producción de biogás se logran con cargas orgánicas iniciales de 10 gSV/L, debido a que se evitan inhibiciones por acumulación de ácidos grasos volátiles en el sistema.

Gráfico 1.

Rendimiento máximo de biogás por combinación experimental (mL/gSV)



Nota. Fuente: Autoría propia



Adicionalmente, el biogás generado por la combinación 1 mostró el mayor porcentaje de hidrógeno molecular H_2 , entre todas las condiciones evaluadas, tal como se muestra en el Gráfico 2, alcanzando un valor superior al 17 %. Esto indica no solo un alto rendimiento en volumen total, sino también una alta calidad energética del biogás, lo que posiciona a esta combinación como la más eficiente para la valorización del lactosuero mediante fermentación oscura.

Gráfico 2.

Porcentaje máximo de hidrógeno (H_2) en el biogás por combinación experimental



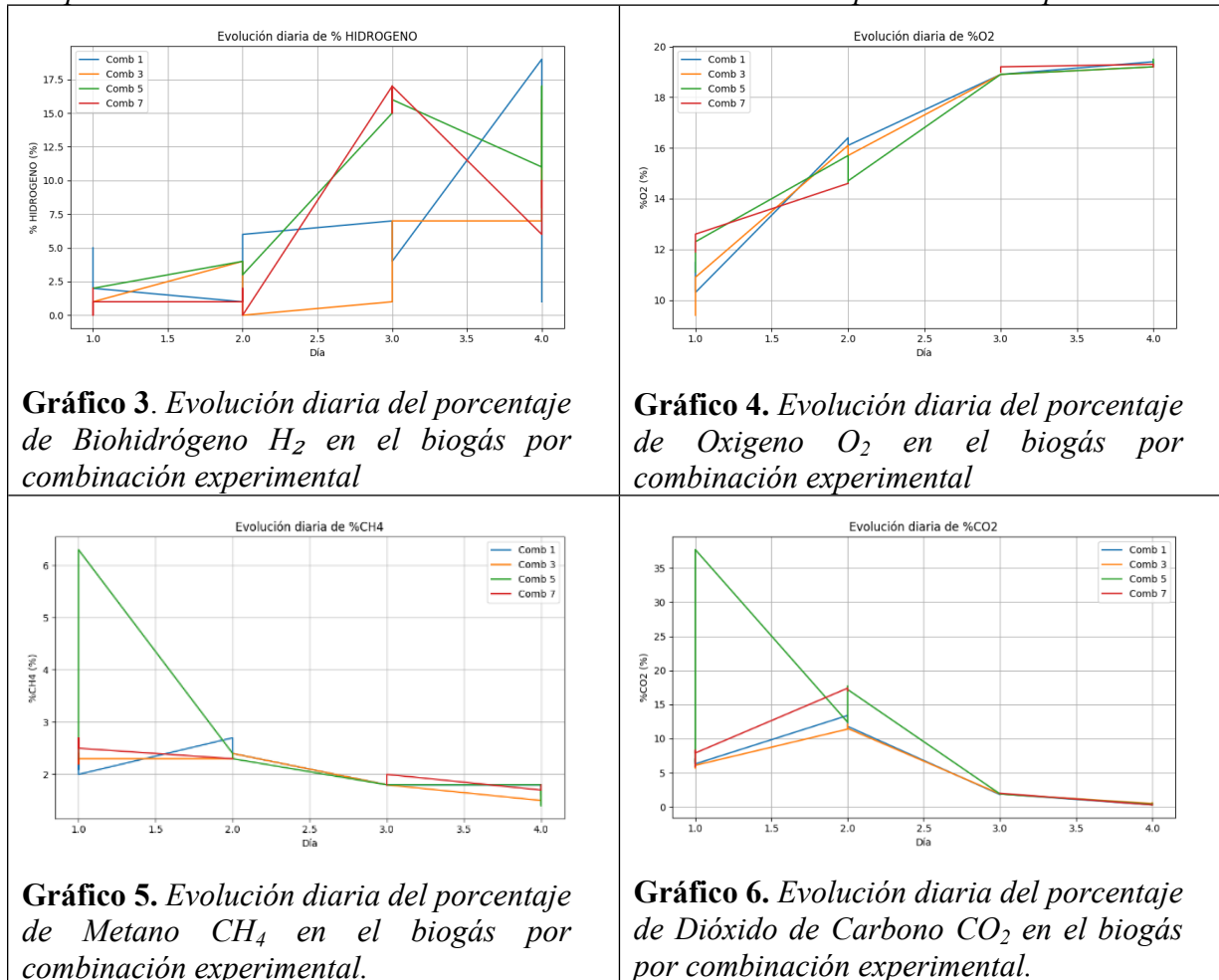
Nota. Fuente: Autoría propia

Los resultados también indican que combinaciones con cargas mayores o relaciones S/X menos equilibradas tienden a disminuir el contenido de H_2 , posiblemente debido al cambio en la actividad microbiana hacia rutas más metanogénicas o acidogénicas desfavorables.



Tabla 4.

Comportamiento diario de cada una de las combinaciones con respecto a su composición.



Nota. Fuente: Autoría propia

Como se evidencia en la Tabla 4, que compila las gráficas de la composición del biogás durante cuatro días de monitoreo, como lo recopiló el grupo investigativo del semillero, donde se observa que la producción de biohidrógeno aumentó significativamente entre los días 3 y 4. Este incremento no se atribuye a la predominancia del consorcio bacteriano acidogénico en esa etapa del proceso. La actividad de estas bacterias favorece la producción de hidrógeno a partir de metabolitos intermedios sin pasar a la fase metanogénica.



Con base a esto, se observa que la concentración de metano se mantuvo baja y con tendencia decreciente, lo que confirma que el sistema permaneció en fase acidogénica durante todo el ensayo. Este comportamiento es indicativo de una fermentación oscura activa, en la cual aún no se han establecido condiciones para la metanogénesis, favoreciendo la acumulación de productos intermedios como H_2 y ácidos grasos volátiles.

Esta investigación permite proponer el escalado del proceso a un sistema productivo real, específicamente en una finca quesera ubicada en Guaduas, Cundinamarca, donde se procesan aproximadamente 160 cántaras de leche diariamente, lo que equivale a unos 6.000 litros de leche fresca destinados a la elaboración de queso fresco. Este volumen genera en promedio 5.120 litros de lactosuero por día, como subproducto de la coagulación y prensado de la cuajada.

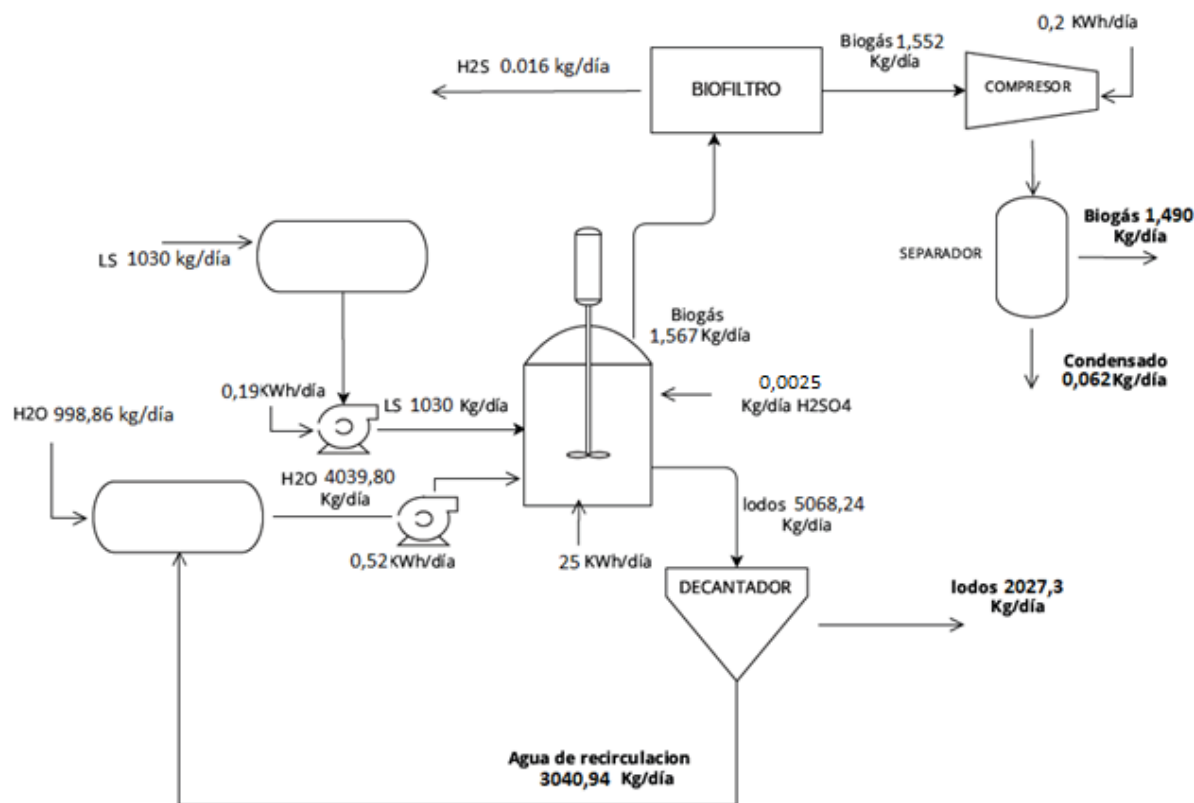
Actualmente, una parte de este lactosuero se utiliza para la elaboración de requesón, y otra se comercializa como suplemento alimenticio para porcicultura. Sin embargo, se estima que alrededor de 1.000 litros diarios de lactosuero no tienen un destino definido y son descartados, lo que representa una oportunidad significativa para su valorización energética.



Para estructurar el proceso de valorización del lactosuero mediante fermentación oscura, se tomó como base la combinación experimental que presentó el mayor rendimiento, lo que permitió escalar el diseño bajo condiciones que garantizan una carga orgánica inicial de 10 gSV/L. A partir de esta base experimental, se definieron los principales flujos de materia involucrados, así como las operaciones necesarias para la transformación del residuo en biogás y su posterior acondicionamiento, la Figura 4 presenta el diagrama de bloques del proceso propuesto

Figura 4.

Diagrama de proceso propuesto para el tratamiento de lactosuero y producción de biogás con purificación



Nota. Fuente: Autoría propia



El proceso inicia con el almacenamiento del lactosuero y el agua en tanques receptores, desde donde son dosificados y alimentados al reactor tipo CSTR. En esta unidad se realiza la mezcla y homogenización de aproximadamente 5.000 litros diarios, de los cuales una proporción significativa corresponde al agua requerida para alcanzar la concentración objetivo de 10 gSV/L. Para reducir el volumen de agua fresca y mejorar la eficiencia hídrica del sistema, se propone un esquema de recirculación del agua contenida en los lodos, recuperada mediante un proceso de decantación.

Se adiciona ácido sulfúrico H_2SO_4 como agente regulador de pH, con el objetivo de mantenerlo en el rango de 4,0 a 5,0. Esta condición favorece el desarrollo de rutas metabólicas acidogénicas y evita la transición hacia la fase metalogénica, con el fin de mantener la producción de hidrógeno y la estabilidad del consorcio bacteriano.

Se espera que el biogás producido en el sistema a escalar se comporte de manera similar a lo observado experimentalmente, manteniendo una concentración promedio de hidrógeno alrededor del 19 %. La producción diaria estimada de biogás sin purificar es de 1,567 kg, lo que equivale aproximadamente a 995,71 litros por día en condiciones normales, como es común en este tipo de procesos, el biogás contiene trazas de sulfuro de hidrógeno H_2S , con una proporción cercana al 1 % y alrededor de 4% de vapor de agua, los cuales se proponen remover mediante un biofiltro y una etapa de condensación como se observa en el diagrama figura 4.



Finalmente, los lodos generados durante el proceso pueden ser valorizados mediante su incorporación en estrategias de recuperación o enriquecimiento de suelos agrícolas, particularmente en aquellos que han sido degradados por la pérdida de materia orgánica. Esta ruta representa una forma complementaria de valorización, que no es abordada en profundidad en el presente trabajo, sin embargo, podría desarrollarse en futuras etapas. Alternativamente, estos lodos también pueden ser reintroducidos en un proceso de metanogénesis, lo que permitiría ampliar aún más el aprovechamiento energético del sistema y mejorar su sostenibilidad integral.



10.1. Análisis de ciclo de vida

Para este apartado se siguió la metodología propuesta por la norma ISO 14040 para realizar el análisis de ciclo de vida al sistema de producción propuesto anteriormente en la figura 4, desde la recepción del sustrato hasta la generación del biogás tratado, con el cual se busca abarcar todas las etapas necesarias propuestas por la norma.

Objetivo y definición de alcance: dentro de los objetivos de este desarrollo se busca identificar los posibles puntos críticos del proceso y el tipo de impactos ambientales que estos conllevan en cada una de las etapas dentro de los límites del proceso propuesto para la producción de biogás con alto potencial de hidrógeno mediante la fermentación oscura. No obstante, para hacer tangible el alcance que este puede tener, es necesario compararlo con otros productos similares obtenidos a partir de sustratos distintos reportados en las bases de datos.

Para el análisis se decidió aplicar un enfoque de puerta a puerta, por lo que se consideran únicamente los impactos asociados a las operaciones comprendidas desde la recepción del lactosuero hasta la obtención del producto final. Esta delimitación responde a la profundidad del estudio y a la disponibilidad de datos, ya que en esta oportunidad se trata una posible disposición hipotética de la planta. La unidad funcional seleccionada para la evaluación fue 1 kilogramo de biogás procesado, dado que es el producto de interés y permite establecer comparaciones consistentes en términos de impacto ambiental



Análisis de inventario (ICV): consistió en la recopilación metódica y cuantitativa de los flujos de entrada y salida de cada una de las etapas comprendidas dentro de los límites del proceso propuesto, como lo son los flujos de agua y lactosuero a la entrada del reactor, fundamentales para mantener la tasa de carga orgánica y así como también los flujos de salida el lodo y la recirculación parcial del agua el cual se llevó a cabo a partir del escalado del proceso experimental realizado en el laboratorio con la combinación de mayor rendimiento.

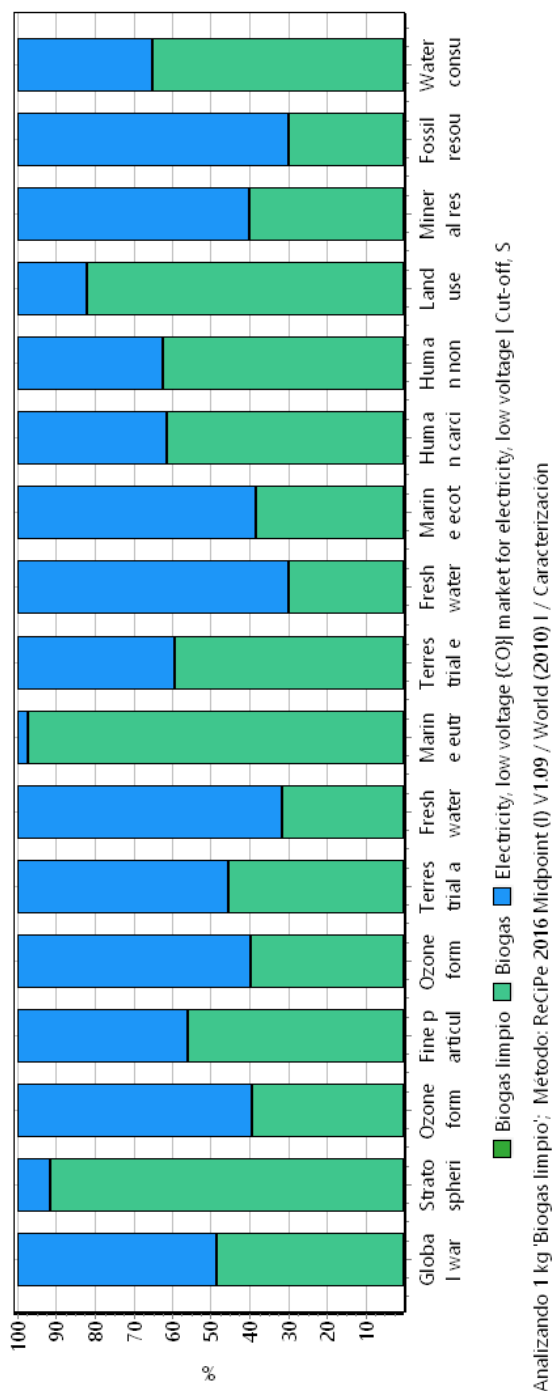
Entre los principales flujos de entrada se consideraron el agua de proceso, el lactosuero como sustrato principal y los recursos energéticos requeridos para la operación de los equipos más representativos del sistema. En cuanto a los flujos de salida, se incluyeron el biogás producido, los lodos generados como subproducto, y una fracción de agua que se recircula parcialmente dentro del sistema para mantener las condiciones de operación. Estos flujos fueron determinados a partir del escalado del proceso experimental, tomando como referencia la combinación de condiciones que presentó el mayor rendimiento en laboratorio.

Análisis de impacto: una vez realizado el análisis de inventario, se procede con este paso para el cual se empleó la metodología ReCiPe 2016 v1.1 MapPoint, del software SimaPro, ya que da una perspectiva más global y de acuerdo con Den Boer *et al* (2005). Castellanos S. (2017), la selección de categorías de impacto se hace en base a los más significativos considerando el modelado completo, es por ellos que nos enfocamos las categorías de cambio climático, consumo de agua, formación de material particulado, entre otras, como se evidencia en el gráfico 7.



Gráfico 7.

Distribución porcentual del impacto ambiental por categoría según el método ReCiPe 2016 Midpoint (I) para la producción de 1 kg de biogás a partir de lactosuero.



Nota. Fuente: SimaPro 9.6.0.1



De acuerdo con la gráfica 7, la mayoría de los impactos se atribuyen al biogás antes de ser purificado, proceso en el cual se le retira el sulfuro de hidrogeno y al consumo eléctrico, necesario para el funcionamiento de los equipos involucrados en el grafico se representa el porcentaje de contribución en cada una de las categorías, mas no la magnitud del impacto.

SimaPro para el análisis consulta las bases de datos establecidas y contrasta los impactos de cada proceso de acuerdo a lo recopilado en ellas como lo es Ecoinvent 3.6, de acuerdo con los resultados el mayor impacto se dio en la categoría de ecotoxicidad terrestre con 0.1974 Kg 1,4DBC eq por un kilogramos de biogás como se observa en la tabla 5, el cual está asociado lo cual esta asociado a la producción del lactosuero debido a que dentro del proceso industrial, este puede arrastrar trazas de metales pesados como cobalto, níquel y cobre.

Las actividades humanas, tanto industriales como urbanas, así como las prácticas agrícolas, pueden incrementar la carga de metales pesados en los ecosistemas acuáticos o alterar sus ciclos naturales al producir concentraciones elevadas en algún compartimento particular de acuerdo con (Tulonen et al. 2006) en Pérez, Rueda y lima (2010), lo que podría explicar la presencia de estos metales en el lactosuero.



Tabla 5.

Magnitud de impactos en cada una de las categorías.

categoría de impacto	unidad	total	biogás limpio	Biogás	electricidad de bajo voltaje
Calentamiento global	kg CO2 eq	0,0953	x	0,0461	0,0492
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	1,1029E-07	x	1,01E-07	9,29E-09
Formación de ozono (salud humana)	kg NOx eq	0,0001375	x	5,39E-05	8,36E-05
Formación de material particulado fino	kg PM2.5 eq	0,00002059	x	1,15E-05	9,09E-06
Formación de ozono (ecosistemas terrestres)	kg NOx eq	0,0001412	x	5,60E-05	8,52E-05
Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0,000444	x	0,000202	0,000242
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0,00002555	x	8,05E-06	1,75E-05
Eutrofización marina	kg N eq	2,8838E-05	x	2,81E-05	7,38E-07
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4 DCB eq	0,1974	x	0,117	0,0804
Ecotoxicidad en agua dulce	kg 1,4 DCB eq	0,0064	x	0,00192	0,00448
Ecotoxicidad marina	kg 1,4 DCB eq	0,001992	x	0,000762	0,00123
Toxicidad carcinogénica humana	kg 1,4 DCB eq	0,00002548	x	1,56E-05	9,88E-06
Toxicidad no carcinogénica humana	kg 1,4 DCB eq	0,00415	x	0,00259	0,00156
Uso del suelo	m2a crop eq	0,1387	x	0,114	0,0247
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0,0002145	x	8,55E-05	0,000129
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq	0,01353	x	0,00405	0,00948
Consumo de agua	m3	0,00136	x	0,000883	0,000475

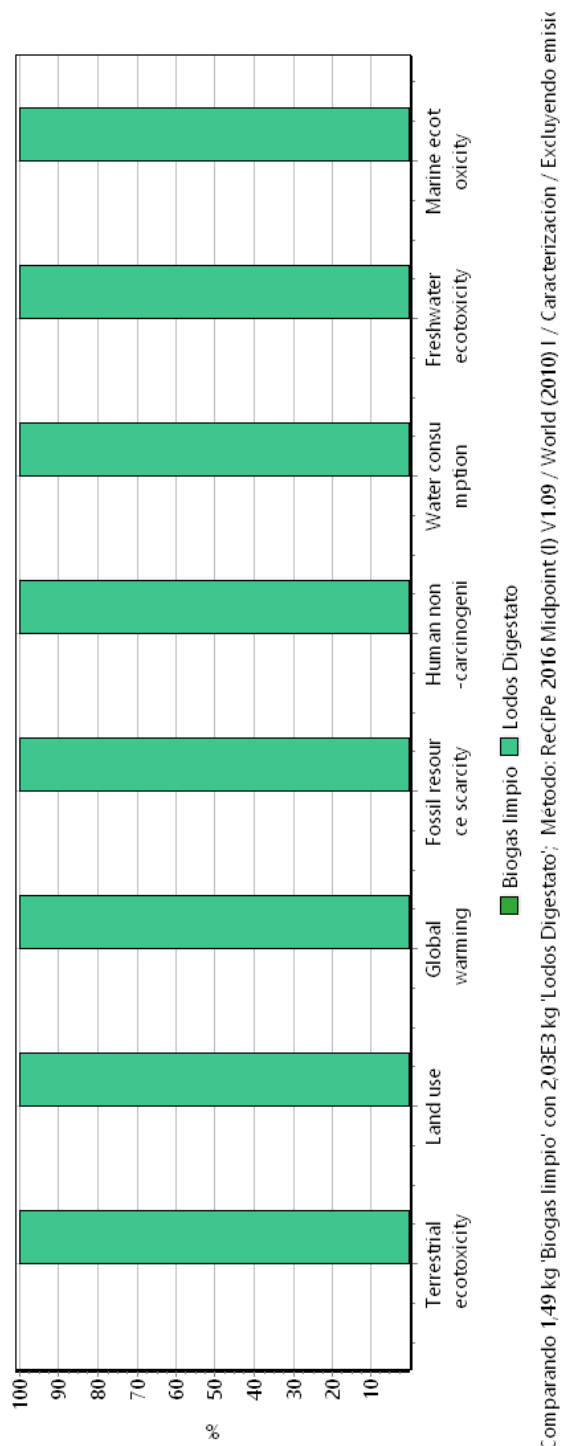
Nota. Fuente: SimaPro 9.6.0.1

Aunque este trabajo se centra en el impacto ambiental que tiene la producción de Biogás, el proceso propuesto tiene un segundo producto del cual no se mencionó en la gráfica de impacto anteriormente expuesta, sin embargo, por la asignación empleada como la música, este tiene el mayor porcentaje, aunque los lodos aun no tienen una disposición final ya que hace parte de una investigación posterior.



Grafica 8.

Distribución porcentual del impacto ambiental por categoría según el método ReCiPe 2016 Midpoint (I) comparación entre lactosuero y biogás.



Nota. Fuente: SimaPro 9.6.0.1

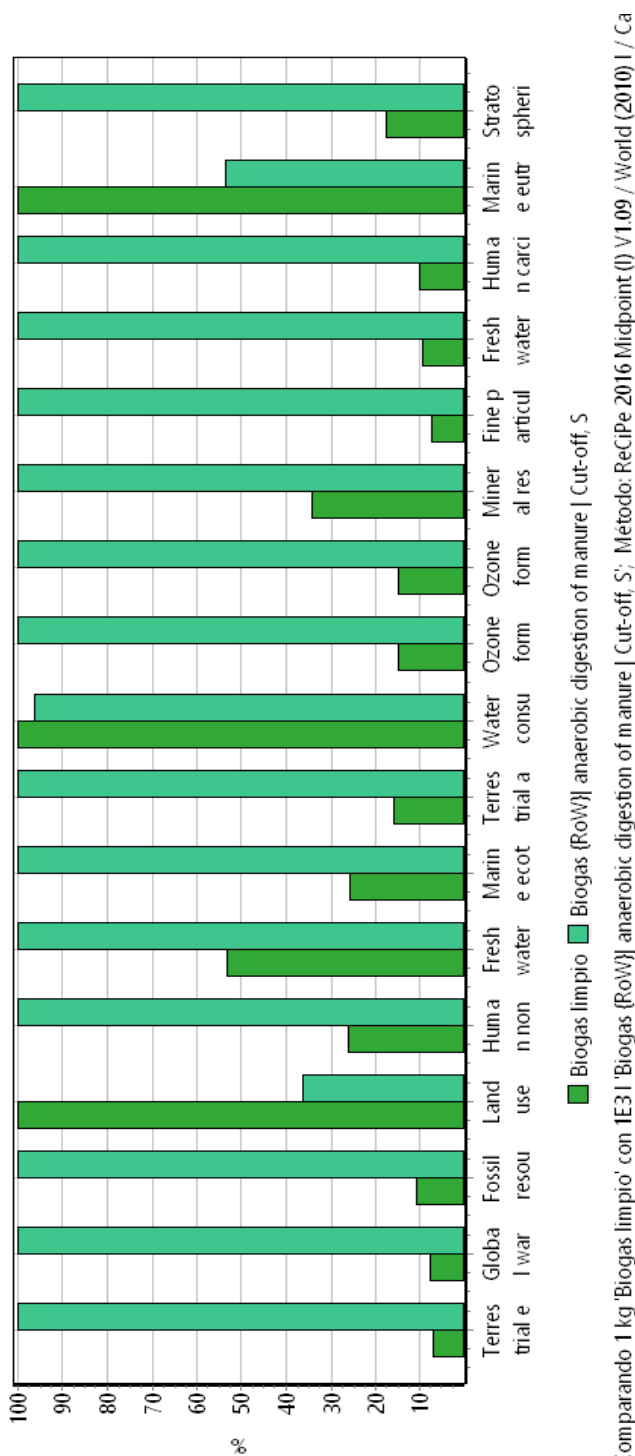


Evidentemente, se observa que los lodos presentan el mayor impacto ambiental debido a la gran diferencia másica en comparación con el biogás, se mantiene la tendencia en las categorías de ecotoxicidad terrestre y calentamiento global como las de mayor relevancia, lo cual está directamente relacionado con los insumos empleados en el proceso, en particular el elevado consumo de lactosuero y agua.



Gráfico 9.

Comparación de impacto entre biogás a partir de lactosuero por fermentación oscura y biogás de digestión anaeróbica de estiércol.



Nota. Fuente: SimaPro 9.6.0.1



La contribución en la mayoría de categorías de impactos evaluados es menor en la producción de biogás a partir de lactosuero por fermentación oscura, a excepción de algunas categorías como el consumo de agua, en la cual ambos procesos presentan impactos similares, lo cual es tal vez una problemática general de las digestiones anaeróbicas. En el ámbito de la contaminación ambiental, el impacto por parte del biogás de digestión anaeróbica de estiércol es de 1,2 kg CO₂ eq por cada 100 litros de biogás, También se observa una diferencia en la ecotoxicidad terrestre, asociada a la actividad agrícola que conllevan estos procesos.



11. Análisis de costos

En este caso se realizó un análisis económico, con el fin de estimar los requerimientos financieros asociados al proceso productivo propuesto para la producción de biogás a partir de lactosuero mediante fermentación oscura y el análisis de ciclo de vida, integrando costos directos y fijos, inversión inicial y capital de trabajo.

Tabla 6.

Costos operativos Planta de Biogás

COSTOS DIRECTOS			
cantidad	concepto	descripción	costo unitario (COP)
2	Mano de obra	Salario de operarios, encargado de funcionamiento de la planta	\$ 2.847.000
-	Materias primas	Insumos requeridos	\$ 831.736
-	Servicios	Servicios necesarios para la operación (energía eléctrica, acueducto)	\$ 448.303
-	mantenimiento	mantenimiento preventivo y reparaciones de equipos	\$ 200.000
Total			\$ 4.327.039

Nota. Fuente: Autoría propia

Como se observa en la tabla 6, donde se compila los costos operativos asociados a la producción de biogás en la planta, tiene un valor mensual de \$ 4.327.039, integrando gastos asociados con materias primas, servicios públicos y mantenimiento preventivo y de reparación.



Tabla 7.

Costos de inversión en equipos para la planta de biogás

INVERSION EN EQUIPOS			
cantidad	concepto	descripción	costo unitario (COP)
1	tanque 2000L		\$ 1.069.900
1	reactor		\$ 1.890.172
1	tanque 5000 L		\$ 3.529.900
1	bomba de 1/2 hp		\$ 205.300
1	bomba de 1 hp		\$ 452.956
1	compresor		\$ 280.000
1	bolsa de almacenamiento biogás		\$ 850.673
1	tanque decantador		\$ 5.802.900
1	tanque lodos		\$ 4.850.000
1	otros		\$ 390.000
Total			\$ 19.146.345

Nota. Fuente: Autoría propia



La Tabla 7 resume los costos de inversión en equipos clave para la operación de la planta de biogás, destacando una inversión total de \$19.146.345 COP, lo cual representa la infraestructura mínima necesaria para garantizar el funcionamiento técnico del sistema.

Tabla 8.

Capital de trabajo

CAPITAL DE TRABAJO		
concepto	descripción	costo unitario (COP)
Materias primas	insumos requeridos para el arranque de la planta los primeros meses de operación	\$ 16.783.971
nomina	salarios de operarios primeros meses	\$ 2.846.000
Servicios	Servicios necesarios para la operación durante primeros meses	\$ 448.303
Total		\$ 20.078.274

Nota. Fuente: Autoría propia

La Tabla 8 presenta el capital de trabajo requerido para los primeros meses de operación de la planta de biogás, con un total de \$20.078.274 COP, asegurando así la continuidad inicial del proceso productivo.

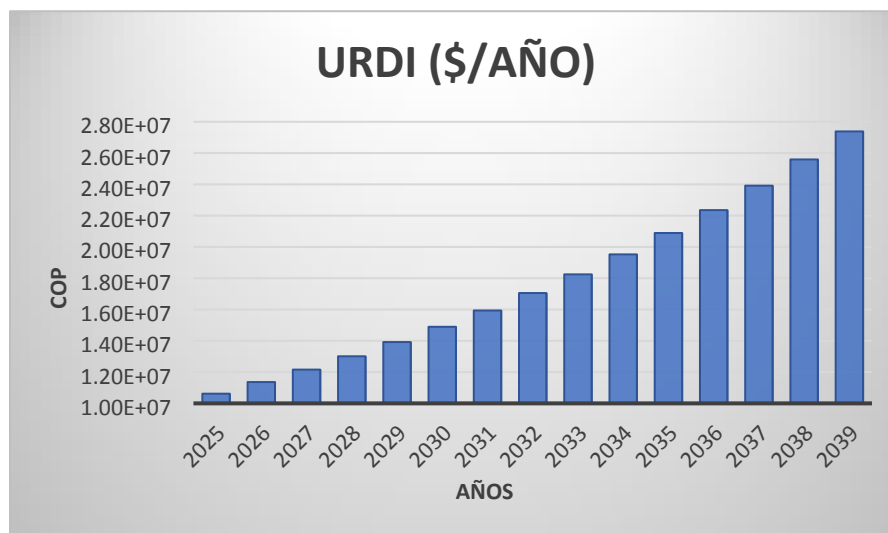


11.1. Análisis de Viabilidad económica

En la evaluación de rentabilidad del proyecto se tomo como base una inflación anual del 7% para realizar las estimaciones convenientes y una tasa de aceptación mínima (TAM) del 20% correspondiente al nivel de riesgo esperado para inversiones en proyectos de aprovechamiento de residuos agroindustriales., por lo que se proyecta que el proyecto tiene un retorno de la inversión en aproximadamente 8 años después de iniciar la operación.

Tabla 9.

Utilidad Retenida Después de Impuestos (URDI)



Nota. Fuente: Autoría propia

En el análisis de la Utilidad Retenida Después de Impuestos se observó una tendencia constante al alza, lo cual resulta bastante alentador. Desde el primer año de operación, en 2025, la URDI ya se ubica cerca de los \$10 millones COP, y para el año 2030 supera los \$14 millones anuales. Este comportamiento refleja que, el capital invertido se va recuperando de manera progresiva gracias a la estabilidad de los ingresos y el buen manejo de los costos.



12. Conclusiones

El análisis estadístico de los datos obtenidos en la investigación previa permitió identificar que el mayor rendimiento de hidrógeno en el biogás alcanzó un 19 %, utilizando una combinación sustrato/inóculo de 4 y una carga orgánica inicial de 10 gSV/L. Este resultado coincide con lo reportado en estudios anteriores, donde también se han obtenido rendimientos máximos cercanos a los 66,38 ml/gSV.

El Biogás producto del escalamiento propuesto tiene un flujo diario de 1,490 kg/día, los cual representa un volumen de flujo significativo, sin embargo se puede potenciar su proyección energética a través de la mezcla con biogás generado por fermentación anaeróbica, el cual puede ser un proceso adjunto a este donde se neutralizan los lodos resultantes y se lleva a metanogénesis en las condiciones adecuadas, con el fin de obtener un producto rico en metano estimándose una entrega energética de 16.142 kW/día.

El impacto ambiental más relevante es la ecotoxicidad terrestre asociado a la producción de los sustratos empleados en cada proceso, en cuanto a el calentamiento global por la producción de biogás mediante fermentación oscura es de 0.0953 kg de CO₂ equivalentes, menor en comparación con los 1,2 kg de CO₂ equivalentes producto de la digestión anaeróbica de estiércol.



El requerimiento energético para el proceso planteado es grande especialmente en el reactor, lo que se puede optimizar con el aprovechamiento de corrientes térmicas residuales de otros procesos internos de la quesera que suministra el lactosuero, Cabe destacar que el requerimiento energético para el calentamiento es relativamente bajo debido a las condiciones climáticas del sitio proyectado (Guaduas, Cundinamarca), cuya temperatura promedio es de $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se debe mantener el reactor en 30°C .

En Viabilidad económica se proyecta un retorno de la inversión luego de 4 años de operación, esto se puede influir de manera positiva la organización siempre que se enfoque el uso del biogás en autoconsumo energético, y se aproveche el digestato o lodo generado el cual representa un recurso valioso si se aprovecha en actividades agrícolas como fertilizante orgánico o si se somete a procesos de metanogénesis secundaria, incrementando así el aprovechamiento energético del sistema.

Este proyecto busca proponer una alternativa sostenible para la valorización consiente de este subproducto en la industria quesera integrándolo a las plantas de producción, con el objetivo de generar un producto con valor energético que puede ser aprovechado y disminuir los impactos ambientales de su disposición.



13. REFERENCIAS

Adolfo, R., Huertas, P. (2008). Aceptado: Abril 16 de. Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, 62(1).

Becerra-Quiroz, A.-P., Rodríguez-Morón, S.-A., Acevedo-Pabón, P.-A., Rodrigo-Illarri, J., & Rodrigo-Clavero, M.-E. (2024). Evaluation of the Dark Fermentation Process as an Alternative for the Energy Valorization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) for Bogotá, Colombia. *Applied Sciences*, 14(8), 3437. <https://doi.org/10.3390/app14083437MDPI>

Castellanos Gutiérrez, S. (2017). *Análisis de ciclo de vida para los biorresiduos sólidos urbanos generados en Bogotá D.C, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Universidad Nacional de Colombia.

Deublein, D., Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. John Wiley y Sons.

Guo, X. M., Trably, E., Latrille, E., Carrère, H., Steyer, J.-P. (2010). Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10660–10673.

International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14044:2006 - Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices. ISO. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

Komesu, A., Oliveira, J. A. R., Martins, L. H. da S., da Silva, M. F., Maciel, M. R. W. (2017). Potential applications of whey for the production of value-added products – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 5881–5896. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.002>

Li, C., Fang, H. H. P. (2007). Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes



by mixed cultures. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37(1), 1–39.

Lorenzo Acosta, Y., Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35–48. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>

Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6.

Nath, K., Das, D. (2004). Improvement of fermentative hydrogen production: Various approaches. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 65(5), 520–529. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1642-3>

Osorio-González, C. S., Gómez-Falcon, N., Brar, S. K., Ramírez, A. A. (2022). Cheese whey as a potential feedstock for producing renewable biofuels: A review. *Energies*, 15(18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15186828>

Pérez, C. A., Rueda, E. H., & Lima, J. C. (2010). Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos ambientales del valle inferior del Río Sauce Grande, sur de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(2), 279–289. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2010000200006

Prazeres, A. R., Carvalho, F., Rivas, J. (2012). Cheese whey management: A review. *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>

Pré Sustainability. (2020). SimaPro: Life cycle assessment software. <https://www.pre-sustainability.com>

Ramírez Navas, J. S. (2011). Aprovechamiento industrial de lactosuero mediante procesos



fermentativos. Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Seghezzo, L. (2004). Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions (Tesis doctoral). Wageningen University, Países Bajos.

Tugtas, A. E., Pavlostathis, S. G. (2007). Effect of sulfide on the performance of anaerobic bioreactors. *Environmental Science and Technology*, 41(16), 5777–5783. <https://doi.org/10.1021/es070376i>

Tugume, M., Ibrahim, M. G., Nasr, M. (2025). Valorization of cheese whey wastewater to achieve sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 211. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115273>

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940.