

Avances en el modelado y simulación de procesos de biometanización aplicados a las aguas residuales de la industria láctea

Alan-Jair Gamboa-Escobar ¹, Carlos-Manuel Astorga-Zaragoza ^{1,*}, Yurika Toledo-Sánchez ¹, Oswaldo Guzmán-López ², Tomás-Eduardo Rodríguez-Ramírez ²

¹ Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: carlos.az@cenidet.tecnm.mx

Bioinformática aplicada a las Energías Renovables (Modelado y simulación de bioprocesos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.605>

Resumen: La industria láctea genera efluentes con alta carga orgánica, lo que representa un desafío ambiental y una oportunidad para la generación de energía renovable mediante digestión anaerobia. La biometanización convierte estos residuos en biogás, contribuyendo a la reducción de contaminantes y al aprovechamiento energético. En los últimos años, el desarrollo de modelos matemáticos y herramientas de simulación ha permitido comprender mejor la dinámica del proceso y optimizar su operación. Este artículo revisa los avances en el modelado y simulación de la biometanización aplicada a aguas residuales de la industria láctea, con énfasis en el modelo de digestión anaerobia ADM1, sus variantes simplificadas, y el uso de plataformas como MATLAB/Simulink y GPS-X, ampliamente empleadas en el modelado dinámico y de plantas de tratamiento, respectivamente; DWSIM y SuperPro Designer, útiles para integrar balances de energía y análisis económico; COMSOL Multiphysics, orientada a la simulación multifísica de transporte de masa y calor; y WEST, AQUASIM, BioWin y OpenModelica, que permiten desde la calibración de parámetros hasta la integración con sistemas energéticos. Se discuten los retos en la integración de datos experimentales, la calibración de parámetros y la implementación de estrategias de control. Finalmente, se identifican tendencias futuras en la digitalización de procesos, gemelos digitales y control predictivo, orientadas hacia la sostenibilidad energética y ambiental.

Palabras clave: biometanización, aguas residuales lácteas, modelado y simulación, ADM1, energías renovables

Advances in modeling and simulation of biomethanization processes applied to wastewater from the dairy industry

Abstract: The dairy industry generates effluents with a high organic load, which represents an environmental challenge and an opportunity for renewable energy generation through anaerobic digestion. Biomethanization converts this waste into biogas, contributing to the reduction of pollutants and energy use. In recent years, the development of mathematical models and simulation tools has allowed for a better understanding of the dynamics of the process and optimization of its operation. This article reviews advances in the modeling and simulation of biomethanization applied to wastewater from the dairy industry, with an emphasis on the ADM1 anaerobic digestion model, its simplified variants, and the use of platforms such as MATLAB/Simulink and GPS-X, widely used in dynamic modeling and treatment plant modeling, respectively; DWSIM and SuperPro Designer, useful for integrating energy balances and economic analysis; COMSOL Multiphysics, geared toward multiphysics simulation of mass and heat transport; and WEST, AQUASIM, BioWin, and OpenModelica, which enable everything from parameter calibration to integration with energy systems. The challenges of integrating experimental data, calibrating parameters, and implementing control strategies are discussed. Finally, future trends in process digitization, digital twins, and predictive control, geared toward energy and environmental sustainability, are identified.

Keywords: biomethanization, dairy wastewater, modeling and simulation, ADM1, renewable energies

Introducción

La industria láctea es una de las principales generadoras de aguas residuales con alta carga de materia orgánica, grasas y nutrientes. Estos efluentes, si no son tratados adecuadamente, representan un impacto ambiental considerable debido a su elevada demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO), que puede provocar eutrofización y deterioro de cuerpos de agua (Demirel *et al.*, 2005).

La digestión anaerobia ha surgido como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, al permitir la estabilización de la materia orgánica y la producción de biogás rico en metano (CH₄), el cual puede

aprovecharse como fuente energética. En este contexto, la biometanización aplicada a efluentes lácteos se ha consolidado como un proceso de doble beneficio: mitigación de contaminación y valorización energética (Batstone *et al.*, 2002).

La necesidad de diseñar, dimensionar y optimizar sistemas de biometanización ha impulsado el desarrollo de modelos matemáticos y simulaciones computacionales. Estas herramientas permiten representar la cinética de degradación de sustratos complejos, analizar el comportamiento de microorganismos en condiciones específicas y predecir la producción de biogás en distintos escenarios. El modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No.1), desarrollado por la IWA, se ha convertido en el referente estándar para la simulación de digestión anaerobia (Batstone *et al.*, 2002).

Además, este tipo de iniciativas están alineadas con la Agenda 2030 para los Objetivos de Desarrollo Sostenible, impulsada por la ONU, especialmente en lo que respecta al ODS 6: Agua limpia y saneamiento, al tratar efluentes con alta carga orgánica y prevenir la contaminación de cuerpos de agua; al ODS 7: Energía asequible y no contaminante, mediante la valorización energética de los residuos a través de la producción de biogás renovable; y al ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, al fomentar el uso de tecnologías de modelado, simulación y control en procesos biotecnológicos avanzados; y con el ODS 13: Acción por el clima, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero gracias al aprovechamiento del metano generado. De esta manera, la biometanización no solo resuelve un problema ambiental, sino que también fortalece la transición hacia sistemas productivos más sostenibles (FAO, 2023). Asimismo, inserta en una economía circular, donde residuos lácteos y otros residuos alimentarios se convierten en biogás mediante digestión anaerobia, promoviendo el uso eficiente de recursos y contribuyendo a los ODS" (Ferdes *et al.*, 2022).

El objetivo de este artículo es revisar los avances recientes en el modelado y simulación de procesos de biometanización aplicados a aguas residuales de la industria láctea, identificando tendencias, retos y oportunidades de mejora en la gestión de este proceso biotecnológico.

Materiales y Métodos

La digestión anaerobia es un proceso biológico que convierte la materia orgánica presente en residuos agroindustriales en biogás, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso ocurre en ausencia de oxígeno y es llevado a cabo por consorcios microbianos que actúan en cuatro fases metabólicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis mostradas a continuación en la Figura 1 (Batstone *et al.*, 2002).

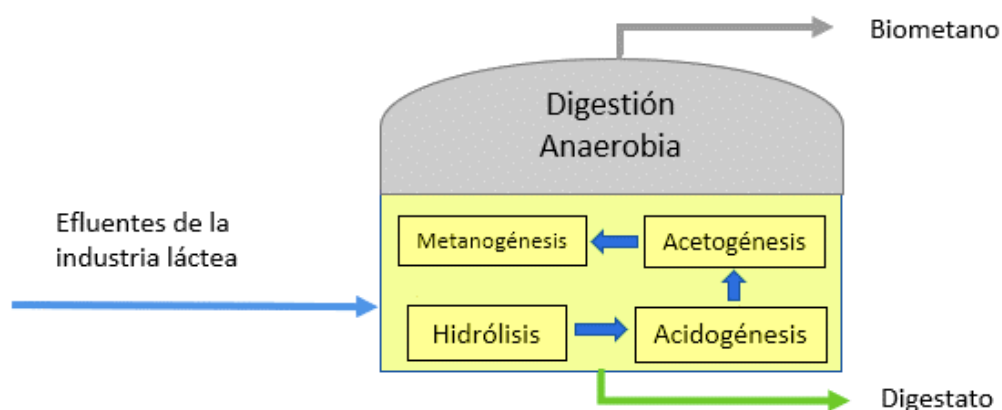


Figura 1. Esquema de la digestión anaerobia de efluentes de la industria láctea con producción de biometano y digestato

En el caso de la industria láctea, los efluentes se caracterizan por contener altas concentraciones de grasas, proteínas y lactosa, lo que genera una elevada carga orgánica expresada en DQO y DBO como se muestra en la Tabla 1. El lactosuero, por su alto contenido de lactosa, proteínas y grasas, presenta un gran potencial para la producción de biogás; sin embargo, su elevada carga orgánica requiere un control cuidadoso de la operación del biorreactor para evitar inhibiciones. Estos parámetros hacen que su vertimiento sin tratamiento represente un serio problema

ambiental, ya que provocan eutrofización y disminución de oxígeno en cuerpos de agua (Demirel *et al.*, 2005). La digestión anaerobia en biorreactores ofrece una solución eficaz, pues permite estabilizar la materia orgánica y, al mismo tiempo, generar biogás como fuente energética renovable (Rajesh Banu *et al.*, 2020).

Tabla 1. Propiedades características del lactosuero proveniente de la industria láctea

Propiedad	Rango característico	Unidad
pH	4.5 – 6.0	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50,000 – 80,000	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO)	40,000 – 60,000	mg/L
Lactosa	35 - 50	g/L
Proteínas	6 - 10	g/L
Grasas	2 - 5	g/L

Los biorreactores anaerobios han sido diseñados en múltiples configuraciones para optimizar la producción de biogás. Entre los más destacados se encuentran los reactores de mezcla completa (CSTR), los reactores de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) y los de lecho fijo o fluidizado. Los CSTR son adecuados para efluentes con alta heterogeneidad, como los lácteos, debido a la homogeneidad que ofrece su mezcla, mientras que los UASB destacan por su alta eficiencia de remoción con bajos tiempos de retención hidráulica como se muestra en la Figura 2 (Demirel & Yenigün, 2017; Rico *et al.*, 2015b).

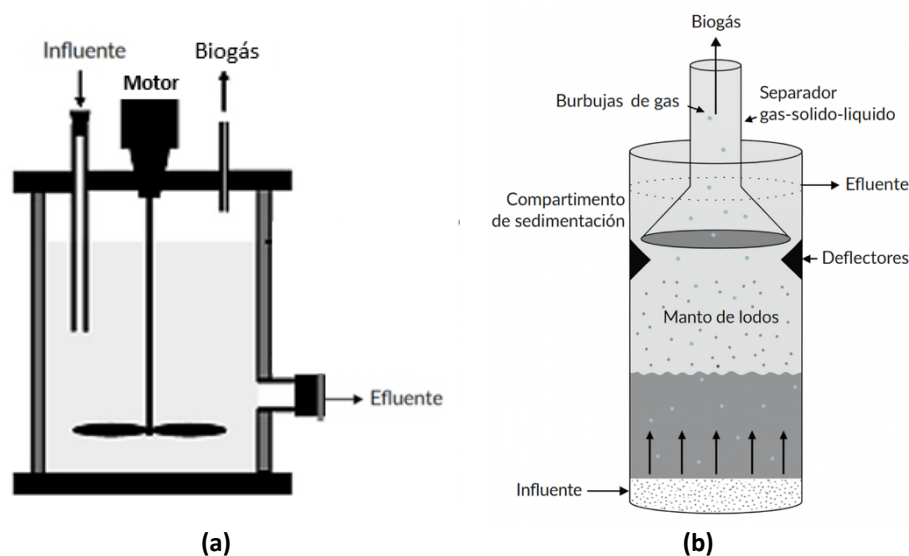


Figura 2. Esquemas de biorreactores anaerobios empleados en el tratamiento de efluentes lácteos: (a) Reactor de mezcla completa (CSTR) y (b) Reactor de flujo ascendente con manto de lodos (UASB)

Diversos estudios han evaluado el desempeño de la digestión anaerobia aplicada a efluentes lácteos. Por ejemplo, Rico *et al.* (2015)b demostraron que la co-digestión de lactosuero con estiércol bovino en reactores UASB mejora la estabilidad del proceso y aumenta el rendimiento de metano. Asimismo, (Aboudi *et al.*, 2015) observaron que la co-digestión de subproductos lácteos con estiércol, bajo tiempos de retención hidráulica adecuados, permite alcanzar mayores eficiencias de remoción de materia orgánica. Resultados similares se han reportado en estudios de optimización que integran residuos lácteos con otros desechos agroindustriales, logrando incrementos en la producción de biogás (Matheri *et al.*, 2017).

En cuanto a los valores de producción, la digestión anaerobia de efluentes lácteos permite obtener rendimientos de 0.3–0.5 m³ CH₄/kg DQO removido, dependiendo de la carga orgánica aplicada y el tipo de reactor (Angelidaki *et al.*, 2018). La Tabla 2 resume los valores característicos reportados para lactosuero y otros efluentes agroindustriales, con base en estudios recientes (Demirel & Yenigün, 2017; Rico *et al.*, 2015b; Feng *et al.*, 2020; Kalyuzhnyi *et al.*, 2000; Mata-

Alvarez *et al.*, 2014; Matheri *et al.*, 2017). Además, configuraciones de dos etapas han mostrado potencial para diversificar productos: la primera etapa destinada a la producción de hidrógeno y la segunda a la generación de metano, aumentando la eficiencia energética del proceso (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000).

Tabla 2. Propiedades características del lactosuero proveniente de la industria láctea y otros efluentes agroindustriales

Sustrato / Efluente	Rango de DQO (mg/L)	Rendimiento de CH ₄ (m ³ /kg DQO)	Referencia
Lactosuero (queserías)	50,000 – 80,000	0.30 – 0.40	Demirel & Yenigün (2017)
Lactosuero + estiércol (cogestión UASB)	40,000 – 70,000	0.35 – 0.45	Rico <i>et al.</i> (2015)b
Aguas residuales lácteas (plantas piloto)	30,000 – 60,000	0.30 – 0.50	Feng <i>et al.</i> (2020)
Residuos lácteos (queso + suero)	45,000 – 85,000	0.32 – 0.48	Kalyuzhnyi <i>et al.</i> (2000)
Residuos efluentes cárnicos	60,000 – 100,000	0.35 – 0.35	Mata-Alvarez <i>et al.</i> (2014)
Residuos efluentes cerveceros	20,000 – 40,000	0.35 – 0.50	Matheri <i>et al.</i> (2017)
Vinazas (destilerías caña/tequila/etanol)	50,000 – 150,000	0.20 – 0.35	Aboutdi <i>et al.</i> (2015)
Efluentes azucareros / melazas	80,000 – 120,000	0.25 – 0.40	Mata-Alvarez <i>et al.</i> (2014)

Finalmente, el uso de modelos matemáticos y simulaciones computacionales ha ganado relevancia en la optimización del proceso. El modelo ADM1 de la IWA sigue siendo el estándar de referencia para describir la digestión anaerobia, y su aplicación a residuos lácteos requiere ajustes específicos en los parámetros cinéticos debido a la complejidad del sustrato (Batstone *et al.*, 2002). Actualmente, la integración de herramientas como MATLAB/Simulink, GPS-X, COMSOL y DWSIM permite realizar simulaciones dinámicas, calibrar parámetros y evaluar estrategias de control en escenarios operativos diversos (Feng *et al.*, 2020; Zambrano *et al.*, 2019).

Modelo ADM1

El Modelo de Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1) desarrollado por la IWA constituye el estándar internacional para la simulación de procesos de digestión anaerobia en aguas residuales y residuos sólidos. Este modelo integra en una formulación estructurada las principales rutas bioquímicas: hidrólisis de carbohidratos, proteínas y lípidos; acidogénesis; acetogénesis; y metanogénesis, considerando además fenómenos de inhibición, balances de masa y transferencia gas-líquido (Batstone *et al.*, 2002). Gracias a su flexibilidad, el ADM1 permite adaptar influentes con distinta composición orgánica, como es el caso de los efluentes lácteos, caracterizados por su alta carga de lactosa, proteínas y grasas. La Tabla 3 resume la asignación de los principales componentes físico-químicos a los estados de ADM1, así como los valores finales utilizados como condiciones de entrada al modelo.

Tabla 3. Asignación de los principales componentes físico-químicos a los estados de ADM1 proveniente de la industria láctea con las siguientes características: lactosa 40 g/L, proteínas 8 g/L, grasas 3.5 g/L.

Componente físico-químico	Estado ADM1	Asignación sugerida	Valor (g DQO/L)
Lactosa (azúcares)	Ssu (azúcares solubles)	90% soluble	38.5 (≈ 0.9×42.8)
Lactosa particulada (si aplica)	Xch (carbohidratos particulados)	10%	4.3
Proteínas solubles (AA)	Saa (aminoácidos)	30%	3.4 (≈ 0.3×11.36)
Proteínas particuladas	Xpr (proteínas particuladas)	70%	7.9
Grasas solubles (AGCL)	Sfa (ácidos grasos de cadena larga)	40%	4.0 (≈ 0.4×10.05)
Grasas particuladas	Xli (lípidos particulados)	60%	6.0
Inertes particulados	Xi	Si no hay dato experimental	0–2 (opcional)
Inertes solubles	Si	Si no hay dato experimental	0–1 (opcional)

Para implementar el ADM1 en el contexto de aguas residuales lácteas, fue necesario realizar la caracterización del influente y su posterior asignación a las fracciones de materia orgánica definidas en el modelo (Batstone *et al.*, 2002). Los parámetros experimentales obtenidos (lactosa, proteínas y grasas) se expresaron en unidades de demanda química de oxígeno (DQO) y fueron distribuidos en sus respectivas fracciones solubles y particuladas, según las

recomendaciones de la literatura para matrices complejas con alto contenido de carbohidratos y lípidos (Rico *et al.*, 2015a; Zaher *et al.*, 2009).

En las últimas dos décadas, el Modelo de Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1) propuesto por la IWA (Batstone *et al.*, 2002) se ha consolidado como el marco de referencia más utilizado para el análisis y simulación de procesos de biometanización. No obstante, debido a la complejidad inherente de su estructura (26 estados y 19 procesos bioquímicos), diversos autores han planteado modificaciones y extensiones orientadas a mejorar su aplicabilidad práctica en distintos escenarios. Entre estos avances destacan las versiones reducidas que simplifican el número de estados para facilitar el control en línea (Zaher *et al.*, 2009), así como su adaptación a nuevos sustratos agroindustriales como lactosuero, vinazas y residuos lignocelulósicos (Rico *et al.*, 2015a; Aboudi *et al.*, 2015). Adicionalmente, se han incorporado nuevas funciones de inhibición para representar los efectos de compuestos como H₂S y ácidos grasos de cadena larga (Demirel & Yenigün, 2017; Angelidaki *et al.*, 2018), y se ha extendido el modelo con balances energéticos y térmicos para predecir la temperatura del reactor y optimizar la integración con sistemas de cogeneración (Pérez-Elvira *et al.*, 2019).

De igual manera, el ADM1 se ha utilizado como plataforma de validación para estrategias avanzadas de control (MPC, lógica difusa, redes neuronales), lo que fortalece su papel como herramienta de ingeniería de procesos más allá de la investigación básica (Astorga-Zaragoza *et al.*, 2008). Por otro lado, su integración en entornos de simulación como Matlab/Simulink, Python y GPS-X, junto con técnicas de calibración automática de parámetros, ha permitido una mayor transferencia tecnológica hacia la operación industrial (Feng *et al.*, 2020). En la Tabla 4 se sintetizan estos avances, los cuales evidencian la evolución del ADM1 desde un modelo estandarizado hacia un marco flexible y adaptable, capaz de abordar la diversidad de matrices residuales y las demandas actuales de eficiencia energética, sostenibilidad y economía circular en la digestión anaerobia.

Tabla 4. Avances en el modelo ADM1 reportados en la literatura

Categoría de avance	Descripción	Referencias
Simplificación de estados	Reducción del número de variables y procesos (ej. eliminación de VFA menores, agrupación de fracciones) para facilitar simulaciones rápidas y control en línea.	Zaher <i>et al.</i> , 2009; Rosen & Jeppsson, 2006
Aplicación a nuevos sustratos	Adaptación del ADM1 para efluentes lácteos (lactosa, proteínas, grasas), vinazas, residuos lignocelulósicos y co-digestión agroindustrial.	Rico <i>et al.</i> , 2015a; Kalyuzhnyi <i>et al.</i> , 2000; Aboudi <i>et al.</i> , 2015
Nuevas inhibiciones	Inclusión de efectos de H ₂ S, ácidos grasos de cadena larga (AGCL) y toxicidad metálica, además de pH, H ₂ y NH ₃ libre del modelo original.	Batstone <i>et al.</i> , 2002; Demirel & Yenigün, 2017; Angelidaki <i>et al.</i> , 2018
Balances energéticos y térmicos	Acoplamiento del ADM1 con balances de energía para predecir temperatura del reactor y optimizar cogeneración/trigeneración.	Pérez-Elvira <i>et al.</i> , 2019; Batstone & Vavilin, 2014
Integración con control avanzado	Uso de ADM1 como banco de pruebas para control P, PI, PID, MPC, lógica difusa y redes neuronales en plantas de biogás.	Zaher <i>et al.</i> , 2009; Astorga-Zaragoza <i>et al.</i> , 2008
Co-digestión	Extensiones del ADM1 para modelar la mezcla de diferentes residuos y evaluar sinergias o inhibiciones en biometanización.	Rico <i>et al.</i> , 2015b; Matheri <i>et al.</i> , 2017
Implementaciones computacionales	Desarrollo de versiones en Matlab/Simulink, Python, GPS-X, DWSIM, AQUASIM, con calibración automática mediante algoritmos evolutivos.	Batstone <i>et al.</i> , 2002; Feng <i>et al.</i> , 2020; Aboudi <i>et al.</i> , 2015

Softwares de simulación

En el ámbito del modelado y la simulación de la digestión anaerobia, el Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) se ha consolidado como el marco de referencia más utilizado a nivel internacional. No obstante, su implementación práctica

depende en gran medida de los softwares de simulación disponibles, los cuales varían en complejidad, accesibilidad y alcance. Cada plataforma ofrece ventajas específicas para la representación de procesos bioquímicos, la calibración de parámetros y la optimización de los digestores anaerobios empleados en la industria láctea.

En la última década, diversos softwares de simulación se han consolidado como herramientas esenciales para el estudio y optimización de procesos de digestión anaerobia en la industria láctea. Entre los más destacados se encuentran MATLAB/Simulink y GPS-X, ampliamente empleados en el modelado dinámico y en la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales, respectivamente. Por su parte, DWSIM y SuperPro Designer permiten integrar balances de energía y materia, además de evaluar la factibilidad económica del proceso, lo que resulta particularmente útil en escenarios de escalamiento industrial.

Asimismo, COMSOL Multiphysics ofrece un enfoque más avanzado orientado a la simulación multifísica, permitiendo representar fenómenos de transporte de masa, calor y reacciones bioquímicas de manera acoplada. En el ámbito especializado de tratamiento de aguas, programas como WEST, AQUASIM y BioWin han demostrado gran utilidad en la calibración de modelos biológicos y en la optimización operativa de reactores. Finalmente, plataformas de código abierto como OpenModelica están ganando terreno, al permitir la implementación de modelos personalizados y su integración con sistemas de control y optimización en tiempo real. En la Tabla 5 se resumen las principales características de estos softwares, destacando sus aplicaciones, fortalezas y limitaciones para el modelado y simulación de la digestión anaerobia aplicada a aguas residuales de la industria láctea.

La comparación de diferentes softwares aplicados a la digestión anaerobia y estimación de producción de metano donde se destacan sus ventajas, limitaciones y capacidad de estimar la producción de metano. Esta información evidencia la diversidad de herramientas disponibles y la importancia de seleccionar la plataforma adecuada en función del objetivo de investigación o aplicación industrial.

Implementación de biometanización.

Casos concretos de plantas de tratamiento de efluentes lácteos reportados en la literatura.

1. Planta UASB en India (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000)

- Se trató lactosuero con DQO de 50,000–70,000 mg/L.
- El sistema alcanzó remociones de DQO del 85–90% y una producción de metano cercana a 0.33 m³ CH₄/kg DQO eliminado.
- Reto: la sobrecarga de lactosa generaba acidificación, requiriendo control estricto del tiempo de retención hidráulico (TRH).

2. Planta de digestión anaerobia en España (Rico *et al.*, 2015b)

- Se evaluó la co-digestión de lactosuero con fracción líquida de estiércol vacuno.
- Producción de biogás: 0.35–0.40 m³ CH₄/kg DQO, mejorando la estabilidad frente a cargas elevadas de azúcares.
- Reto: necesidad de balance de nutrientes (C/N) para evitar inhibición por amonio.

3. Planta piloto en Dinamarca (Demirel & Yenigün, 2017)

- Digestión de suero lácteo en CSTR mesofílico.
- Se obtuvieron reducciones de 70–80% de DQO y biogás con 65% de CH₄.
- Reto: el contenido graso del efluente provocó inhibiciones por ácidos grasos de cadena larga (AGCL), lo que obliga a aplicar estrategias de pretratamiento (homogeneización, separación de grasas).

Tabla 5. Comparación de softwares de simulación aplicados a la digestión anaerobia y estimación de producción de metano

Software	Aplicación principal	Ventajas	Limitaciones	¿Permite estimar producción de metano?
MATLAB/Simulink	Modelado dinámico de procesos, control y simulación en tiempo real	Flexibilidad para implementar modelos como ADM1, integración con controladores	Requiere programación avanzada y licencias de pago	Sí, mediante ecuaciones del ADM1 y balances de carbono
GPS-X	Simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales	Incluye biblioteca ADM1, interfaz amigable, calibración integrada	Software comercial, alto costo	Sí, calcula CH ₄ y CO ₂ como productos de la digestión
DWSIM	Simulación de procesos químicos con balances de materia y energía	Código abierto, integración de termodinámica	Limitado en cinéticas biológicas, requiere personalización	Posible, pero requiere implementar modelo cinético adicional
SuperPro Designer	Evaluación económica y balances de procesos biotecnológicos	Integra balances de proceso + análisis económico, útil en escalado	Limitado en detalle cinético, requiere integración externa	Parcial: puede estimar metano a partir de rendimientos globales
COMSOL Multiphysics	Simulación multifísica: transferencia de calor, masa y fluidos	Modelado CFD avanzado, transporte acoplado de sustratos	Requiere hardware potente, curva de aprendizaje alta	Sí, si se integra cinética ADM1 o parámetros bioquímicos
WEST	Modelado de procesos de tratamiento de aguas	Soporta ADM1, calibración de parámetros	Software comercial	Sí, incluye producción de metano en el balance
AQUASIM	Modelado y calibración de procesos biológicos en aguas	Permite simulación dinámica y calibración detallada	Visualización gráfica limitada	Sí, calcula producción de metano a nivel experimental y de laboratorio
BioWin	Simulación de plantas de tratamiento y digestión anaerobia	Interfaz gráfica intuitiva, validación industrial	Menos personalizable que MATLAB o GPS-X	Sí, con resultados directos de producción de biogás/metano
OpenModelica	Simulación dinámica basada en lenguaje Modelica	Código abierto, flexible y multiplataforma	Menos documentación para digestión anaerobia	Sí, pero requiere programación avanzada de modelos cinéticos

Resultados y Discusión

Los resultados reportados en plantas de tratamiento de efluentes lácteos muestran que la biometanización es una alternativa viable para la reducción de carga orgánica y la generación de energía renovable. En sistemas UASB aplicados a lactosuero con altas cargas orgánicas se han alcanzado remociones de DQO superiores al 85% y producciones de metano del orden de 0.30–0.35 m³ CH₄/kg DQO eliminado (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000). Asimismo, la co-digestión con estiércol ha demostrado mejorar la estabilidad del proceso, incrementando la producción de biogás hasta 0.40 m³ CH₄/kg DQO y reduciendo problemas de acidificación (Rico *et al.*, 2015b). Sin embargo, se han identificado limitaciones relacionadas con la acumulación de ácidos grasos de cadena larga y el desbalance nutricional, lo que resalta la necesidad de estrategias de pretratamiento y control de parámetros operativos (Demirel & Yenigün, 2017). Estos ejemplos evidencian tanto el potencial energético como los retos técnicos asociados a la biometanización de efluentes lácteos, aspectos que deben considerarse en la implementación industrial y en el diseño de modelos como el ADM1.

La revisión de los modelos y herramientas de simulación aplicadas a la digestión anaerobia de efluentes lácteos evidencia que, si bien el ADM1 constituye el estándar de referencia, aún persisten retos en su implementación a nivel

industrial debido a la necesidad de calibración intensiva de parámetros y a la variabilidad inherente en la composición de los residuos lácteos. Los softwares analizados (MATLAB/Simulink, GPS-X, DWSIM, COMSOL, entre otros) permiten abordar distintas dimensiones del proceso: desde la dinámica bioquímica hasta la integración energética y económica.

Oportunidades de mejora y tendencias

En cuanto a las oportunidades de mejora, se identifican varias líneas críticas que pueden potenciar el desempeño del proceso de biometanización:

Integración de inteligencia artificial (IA): algoritmos de machine learning y control predictivo avanzado ofrecen la posibilidad de mejorar la predicción de la producción de biogás y la detección temprana de fallas.

Digitalización y gemelos digitales: la incorporación de plataformas de modelado dinámico en tiempo real podría permitir la creación de gemelos digitales de plantas de biometanización, optimizando la operación y facilitando la toma de decisiones.

Optimización multiobjetivo: los futuros modelos deberán considerar simultáneamente la eficiencia energética, la viabilidad económica y la reducción de emisiones, integrando análisis de ciclo de vida (LCA).

Calibración automática de parámetros: el uso de técnicas de optimización y metamodelos híbridos (físico-datos) facilitará la adaptación del ADM1 y sus variantes a diferentes matrices de efluentes lácteos.

Integración con economía circular: la digestión anaerobia de residuos lácteos no solo debe enfocarse en biogás, sino también en la recuperación de nutrientes (N, P) y en la valorización de digestato como biofertilizante.

En términos de tendencias, se proyecta que la próxima década estará marcada por la automatización de plantas de biogás, la adopción de sistemas híbridos físico-datos, y la transición hacia un enfoque de bio-refinerías lácteas, donde los residuos se transformen en múltiples productos de valor (biometano, biofertilizantes, agua tratada). Estas innovaciones, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, consolidarán la biometanización como un pilar clave en la transición energética y en la sostenibilidad de las industrias lácteas y agroalimentarias.

Conclusiones

La digestión anaerobia de efluentes de la industria láctea representa una alternativa tecnológica con doble beneficio: la mitigación de impactos ambientales asociados a la elevada carga orgánica de estos residuos y la producción de biogás como fuente renovable de energía. El análisis realizado evidencia que el modelo ADM1 constituye la herramienta de referencia para describir la compleja interacción bioquímica del proceso, permitiendo predecir la producción de metano y evaluar escenarios de operación. Sin embargo, su aplicación práctica requiere ajustes específicos en la calibración de parámetros y adaptación a las características particulares de los efluentes lácteos.

Asimismo, los softwares de simulación revisados ofrecen un amplio espectro de posibilidades, desde el modelado dinámico (MATLAB/Simulink, GPS-X) hasta la integración de balances de energía y análisis económico (DWSIM, SuperPro Designer), lo que abre la puerta a evaluaciones más holísticas del proceso. A pesar de estos avances, persisten limitaciones en la validación a escala industrial y en la implementación de estrategias de control avanzadas.

De cara al futuro, la convergencia de la digitalización, los gemelos digitales y la inteligencia artificial marcará una tendencia clave en la optimización de sistemas de biometanización, consolidando su papel dentro de la economía circular y la transición energética. En este sentido, los biorreactores anaerobios aplicados a la industria láctea no solo deberán ser concebidos como unidades de tratamiento, sino como componentes estratégicos de bio-refinerías que permitan maximizar el aprovechamiento energético y la valorización de subproductos.

En conclusión, la integración de modelos matemáticos, plataformas de simulación y tecnologías emergentes constituye el camino hacia procesos de biometanización más eficientes, resilientes y sostenibles, capaces de responder a los desafíos ambientales y energéticos contemporáneos.

Agradecimientos y financiamiento: Alan Gamboa agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por apoyar sus estudios de maestría en ciencias de la ingeniería. Los autores también agradecen al Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza, del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, y al Dr. Oswaldo Guzmán López, de la Universidad Veracruzana, por su orientación, cuya supervisión fue esencial para el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2015). Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproducts and cow manure: Effect of hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, *190*, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.038>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, *36*(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Astorga-Zaragoza, C. M., González-Álvarez, V., Reyes-Reyes, J., & Puebla, H. (2008). Observer-based monitoring of heat exchangers: Application to fault detection. *Chemical Engineering Science*, *63*(24), 6076–6086. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.09.009>
- Batstone, D. J., & Virdis, B. (2014). The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. *Current Opinion in Biotechnology*, *27*, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.013>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, *45*(10), 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Bernard, O., & Chachuat, B. (2015). Mathematical modeling of anaerobic digestion. En C. Batt & M. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology* (pp. 156–164). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00214-4>
- Björnsson, L., Murto, M., & Mattiasson, B. (2001). Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *54*(6), 844–849. <https://doi.org/10.1007/s002530100694>
- Demirel, B., & Yenigün, O. (2017). Anaerobic digestion of dairy wastewaters: A review. *Process Biochemistry*, *51*(12), 1528–1541. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.020>
- Demirel, B., Yenigün, O., & Onay, T. T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewater: A review. *Process Biochemistry*, *40*(8), 2583–2595. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.015>
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves-Lara, C. A., & Wouwer, A. V. (2011). Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review. *Water Research*, *45*(17), 5347–5364. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.059>
- FAO. (2023). *The State of Food and Agriculture 2023 – Revealing the true cost of food to transform agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Feng, L., Luo, J., & Chen, Y. (2020). Anaerobic digestion of dairy wastewater for methane production: Current status and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *133*, 110287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110287>
- Ferdeş, M., Zabavă, B. S., Paraschiv, G., Ionescu, M., Dincă, M. N., & Moiceanu, G. (2022). Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. *Energies*, *15*(17), 6268. <https://doi.org/10.3390/en15176268>
- Kalyuzhnyi, S., Veeken, A., & Hamelers, B. (2000). Two-stage anaerobic digestion of cheese whey: Hydrogen production and methanogenesis. *Water Science and Technology*, *41*(3), 141–148. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0065>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *36*, 412–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Matheri, A. N., Belaid, M., & Muzenda, E. (2017). Optimization of biogas production from anaerobic co-digestion of wastewater sludge and food waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.029>
- Pérez-Elvira, S. I., Fdz-Polanco, M., & Garrido, J. M. (2019). Energy and thermal integration of anaerobic digestion: A review of strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114*, 109332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109332>
- Rajesh Banu, J., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., & Yogalakshmi, K. N. (2020). Anaerobic digestion of dairy wastewater for energy recovery: Recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology*, *302*, 122829. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122829>
- Rico, C., García, H., & Rico, J. L. (2015)a. Physical-anaerobic treatment of dairy manure with high content of solids: Evaluation by the ADM1 model. *Waste Management*, *43*, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.027>
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., & Rico, J. L. (2015)b. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrate ratio and organic loading rate. *Science of the Total Environment*, *505*, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.098>
- Rosen, C., & Jeppsson, U. (2006). *Aspects on ADM1 implementation within the BSM2 framework*. Lund University.
- Vavilin, V. A., Fernandez, B., Palatsi, J., & Flotats, X. (2008). Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, *28*(6), 939–951. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.028>
- Zaher, U., Buffiere, P., Steyer, J. P., & Chen, S. (2009). Application of the ADM1 model to simulate anaerobic digestion of a full-scale municipal solid waste digester. *Environmental Technology*, *30*(9), 959–971. <https://doi.org/10.1080/09593330902948004>
- Zambrano, J., Pino, N., & Torres, L. (2019). Simulation of anaerobic digestion processes using MATLAB/Simulink. *Environmental Technology*, *40*(10), 1283–1294. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1418917>