

Artículo de Revisión

ANÁLISIS DE LOS AVANCES EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE BIOETANOL UTILIZANDO BIOMASA LIGNOCELULÓSICA APOYADOS EN LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

**ANALYSIS OF ADVANCES IN SUSTAINABLE BIOETHANOL PRODUCTION
USING LIGNOCELLULOSIC BIOMASS SUPPORTED BY
ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Sheila María Acosta Rodríguez^{1*} <https://orcid.org/0009-0004-1292-3109>

Jennifer Álvarez García¹ <https://orcid.org/0009-0007-1837-9732>

Rosario Claudia Almodobal Ramos¹ <https://orcid.org/0009-0001-4768-2251>

Yaillet Albernas Carvajal¹ <https://orcid.org/0000-0003-4363-4401>

Ronaldo F. Santos Herrero¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia.
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Septiembre 24, 2025; Revisado: Octubre 11, 2025; Aceptado: Noviembre 1º, 2025

RESUMEN

Introducción:

La biomasa lignocelulósica es una fuente renovable abundante y económica para la producción de bioetanol. Su aprovechamiento reduce la dependencia de combustibles fósiles y proporciona una vía para la valorización de residuos agroindustriales.

Objetivo:

Examinar los avances tecnológicos y estratégicos en la producción de bioetanol en el marco de las biorrefinerías, con el apoyo de la Inteligencia Artificial (IA).

Materiales y Métodos:

Se realizó una búsqueda en la literatura especializada, destacando estrategias innovadoras y el empleo de inteligencia artificial (IA) en biorrefinerías, mediante herramientas como DeepSeek y Perplexity.

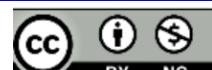
Resultados y Discusión:

Se identificaron sustratos prometedores como la paja de caña de azúcar y el bagazo por su alto contenido de celulosa. Asimismo, se analizaron pretratamientos innovadores



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Sheila M. Acosta, Email: sheilamariaacosta@gmail.com



(explosión de vapor asistida, ultrasonidos, disolventes eutécticos, bifásico) para mejorar la liberación de azúcares fermentables. La reutilización de enzimas y el uso de cocteles enzimáticos autóctonos se perfilan como estrategias clave para reducir los costos de producción, optimizando la etapa de hidrólisis. La integración del concepto de biorrefinería permite la valorización de residuos en un modelo de economía circular. La IA, mediante redes neuronales artificiales y aprendizaje automático, emerge como una herramienta poderosa para optimizar los procesos, predecir rendimientos y reducir costos experimentales.

Conclusiones:

La producción sostenible de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica se ve potenciada por la combinación de tecnologías avanzadas y el apoyo de la IA. Esta sinergia se posiciona como una tecnología clave para superar los desafíos de escalamiento y rentabilidad, impulsando el desarrollo de biorrefinerías inteligentes y sostenibles.

Palabras clave: bioetanol; biorrefinería; pretratamiento; redes neuronales; rendimiento.

ABSTRACT

Introduction:

Lignocellulosic biomass is an abundant and cost-effective renewable source for bioethanol production. Its utilization reduces dependence on fossil fuels and provides a means for valorizing agro-industrial residues

Objective:

To examine technological and strategic advances in bioethanol production within the framework of biorefineries, with the support of Artificial Intelligence (AI).

Materials and Methods:

A search was conducted in the specialized literature, highlighting innovative strategies and the use of innovative strategies and the use of artificial intelligence (AI) in biorefineries, using tools such as DeepSeek and Perplexity.

Results and Discussion:

Promising substrates such as sugarcane straw and bagasse were identified due to their high cellulose content. Innovative pretreatments (steam explosion-assisted, ultrasound, eutectic solvents, biphasic) were also analyzed to improve the release of fermentable sugars. Enzymes reuse and the use of native enzymatic cocktails emerge as key strategies to reduce production costs by optimizing the hydrolysis stage. The integration of the biorefinery concept allows for the valorization of waste within a circular economy model. AI, through artificial neural networks and machine learning, emerges as a powerful tool to optimize processes, predict yields, and reduce experimental costs.

Conclusions:

The sustainable production of bioethanol from lignocellulosic biomass is enhanced by the combination of advanced technologies and the support of AI. This synergy positions itself as a key technology to overcome the challenges of scaling and profitability, driving the development of intelligent and sustainable biorefineries.

Keywords: bioethanol; biorefinery; pretreatment; neural networks; yield.

1. INTRODUCCIÓN

La biomasa lignocelulósica constituye la materia prima más abundante en el planeta. Al ser una fuente económica y rica en azúcares fermentables C6 (hexosas) y C5 (pentosas), presenta un gran potencial como insumo en biorrefinerías y para la producción de biocombustibles. Su aprovechamiento podría reducir la competencia por el uso de la tierra entre la producción de alimentos y la generación de energía, posicionándose como un recurso renovable atractivo para la obtención de bioetanol.

El desarrollo de bioetanol a partir de residuos agroindustriales no solo ofrece una solución para la gestión de desechos, sino también una alternativa prometedora para satisfacer la demanda energética global (Göncü & Hoşgün, 2025). Además, contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 75% en comparación con los combustibles fósiles. Su implementación ayuda a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y genera beneficios económicos mediante la creación de productos de valor agregado a partir de residuos agrícolas, apoyando así los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático y promover la sostenibilidad ambiental.

No obstante, la producción de biocombustibles a gran escala enfrenta desafíos importantes debido a limitaciones tecnológicas y altos costos. La creciente demanda de bioetanol, impulsada por políticas que exigen su mezcla con gasolina (Punia & Kumar, 2025), ha incrementado el interés en el bioetanol de segunda generación obtenido a partir de biomasa lignocelulósica. Pese a los desafíos técnicos y económicos asociados a su conversión, se han desarrollado modelos innovadores basados en economía circular que buscan combinar rentabilidad con sostenibilidad. Países como China, Brasil y Estados Unidos consideran estratégica la creación de energías alternativas a partir de materias primas renovables.

Las tecnologías avanzadas actuales se enfocan en la conversión de la biomasa en energía renovable para transporte, gracias a su bajo costo de inversión y procesos no contaminantes. Sin embargo, el alto costo del pretratamiento y la hidrólisis enzimática sigue siendo un obstáculo significativo (Ghazali & Mustafa, 2025). En este contexto, la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático surgen como herramientas clave para optimizar los procesos de innovación, reducir riesgos, costos, y mejorar la eficiencia en la producción de bioetanol dentro del marco de las biorrefinerías. Este artículo tiene como objetivo examinar los avances tecnológicos y estratégicos en la producción de bioetanol en el marco de las biorrefinerías, con el apoyo de la Inteligencia Artificial (IA).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este artículo se realiza una revisión exhaustiva en la literatura científica actualizada a cerca de los avances en la producción sostenible de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica. Se destacan estrategias innovadoras y el uso de inteligencia artificial (IA) en biorrefinerías, mediante herramientas como DeepSeek y Perplexity. Asimismo, se enfatiza en el papel de la vigilancia tecnológica en el análisis del enfoque actual sobre la aplicación y producción de biocombustibles.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El interés por el uso de materiales lignocelulósico como materia prima en procesos de transformación microbiana se ha mantenido durante décadas, debido al valor de sus tres componentes principales: celulosa, hemicelulosas y lignina. La celulosa y la hemicelulosa se emplean principalmente para la producción de etanol y biomasa, mientras que la lignina se utiliza como combustible, adhesivo o inmunoadyuvantes.

La celulosa tiene una estructura cristalina y resistente y avances recientes, como el uso de celulasas termoestables y pretratamiento por ultrasonido, han mejorado significativamente la eficiencia de su hidrólisis, reduciendo el consumo energético y maximizando el rendimiento de azúcares.

La hemicelulosa, con su estructura amorfa es fácil de hidrolizar. Métodos como la hidrólisis asistida por microondas y la explosión de vapor han demostrado ser efectivos para incrementar la producción de azúcares fermentables.

Por su parte, la lignina es el componente más recalcitrante de la biomasa. Su descomposición representa uno de los mayores desafíos en el procesamiento de biomasa. No obstante, pretratamientos oxidativos permiten modificar su estructura y facilitar el acceso a la celulosa, además de que puede valorizarse para producir bioaceites y diversos compuestos químicos.

3.1. Sustratos lignocelulósicos utilizados para la producción de bioetanol

La biomasa lignocelulósica está compuesta mayoritariamente por carbohidratos complejos por lo que requiere un pretratamiento eficiente que facilite el acceso a los azúcares fermentables, necesarios para posteriormente obtener bioetanol mediante fermentación.

La búsqueda de fuentes de carbohidratos innovadoras y funcionales ha adquirido gran relevancia en investigaciones recientes. Factores como la composición bioquímica, disponibilidad, impacto ambiental, valor económico y beneficios asociados determinan su viabilidad. Se estima que para el año 2050 dos tercios de las demandas energéticas globales podrían ser cubiertas mediante estos recursos (Morejón & Llano, 2025).

El rendimiento de bioetanol depende del tipo de biomasa utilizada, determinado principalmente por su bajo contenido de lignina y sus elevados porcentajes de celulosa y hemicelulosa, como se ilustra en las Tablas 1 y 2. En este contexto la IA desempeña un papel crucial, ya que puede facilitar la selección de materias primas adecuadas sin necesidad de realizar investigaciones extensivas y costosas.

Tabla 1. Caracterización de las materias primas lignocelulósica utilizadas para la producción de bioetanol

Materiales LCB	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencias
Cáscara de avellana	30	35	32	(Brlekovic et al., 2024)
Bagazo de caña	42,91	27,92	9,74	(Morales, 2024)
Paja de caña de azúcar	36,91	19,73	13,51	(Mesa et al., 2017)

Paja de cebada	40	27,2	7,8	(Raud et al., 2021)
Sorgo dulce	29	22,68	24,68	(Holguín et al., 2017)
Paja de trigo	47,1	12,7	34,5	(Díez, 2014)
Cascarilla de arroz	39	20	22	(Morales, 2024)

Tabla 2. Rendimientos, tipo de fermentación y microorganismos utilizados

<i>Tipo de biomasa</i>	<i>Tipo de fermentación</i>	<i>Microrganismos</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Referencias</i>
Paja de caña de azúcar	PSSF	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	66 g/L	(Mesa et al., 2017)
Sorgo dulce	SSF	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10,96 g/L	(Holguín et al., 2017)
Cáscara plátano	SHF	<i>Kluyveromyces marxianus</i>	21 g/L	(Palacios et al., 2017)
Paja de trigo	SHF	<i>S. cerevisiae</i> NX11424	37 g/L	(Morejón & Llano, 2025)
Bagazo de caña de azúcar	SHF	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	9,52 g/L	(Corea & García, 2019)

La selección de la biomasa adecuada es crucial para la producción de bioetanol. Mediante un análisis con IA, utilizando herramientas como Perplexity, se determina que el bagazo, la paja de azúcar y la paja de trigo destacan por su alto contenido de celulosa y rendimientos promisorios, lo cual concuerda con los resultados de la tabla 1. Por ello, es fundamental emplear estos métodos para realizar simulaciones que permitan predecir mezclas óptimas, con el fin de maximizar el rendimiento de etanol, aprovechar subproductos agroindustriales y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

3.2. Estudio de los pretratamientos para su obtención

La creciente demanda global de bioetanol como combustible y producto químico impulsa la optimización de su producción a partir de biomasa lignocelulósica, donde el pretratamiento constituye una etapa crucial para separar sus componentes principales (lignina, celulosa y hemicelulosa).

Entre las técnicas convencionales, la explosión de vapor destaca por su bajo impacto ambiental y la mínima generación de subproductos tóxicos, reportando eficiencias de hasta 600 g de azúcares por kg de biomasa. No obstante, su principal desventaja radica en los elevados costos energéticos y en la formación de inhibidores de la fermentación. Innovaciones recientes, como el pretratamiento por termopresión asistido por microondas, han demostrado una mejora en las tasas de recuperación de azúcares y una reducción en el consumo energético en comparación con la explosión de vapor convencional. Asimismo, se ha observado que la adición de catalizadores alcalinos durante el proceso mejora la remoción de lignina, incrementando la accesibilidad a la celulosa (Woźniak et al., 2025).

En cuanto a los pretratamientos químicos, los ácidos diluidos (sulfúrico, clorhídrico, nítrico y fosfórico) aumentan la superficie de la biomasa y facilitan la degradación de la lignocelulosa, aunque presentan eficacia limitada para eliminar la lignina y generan subproductos inhibidores como el furfural y hidroximetilfurfural interfiriendo en la sacarificación enzimática y la fermentación siendo necesaria una etapa de desintoxicación. Alternativas como el ácido fosfórico han mostrado eficiencia en la reducción de lignina con una menor corrosión en los equipos (Domínguez et al., 2012). Por su parte, el ácido nítrico (HNO_3) ha sido evaluado como catalizador y fuente de nitrógeno para la fermentación, logrando un rendimiento de xilosa del 86.5% y una digestibilidad enzimática del 83% en paja de arroz (Kim et al., 2014). No obstante, el ácido sulfúrico diluido sigue siendo el más utilizado debido a su bajo costo y alta eficiencia en la liberación de azúcares (hasta 700 g de azúcares/kg de biomasa).

Como alternativa promisoria, los disolventes eutécticos profundos (DES) emergen como medios "verdes" de alta eficiencia, logrando rendimientos de hasta 750 g de azúcares /kg de biomasa (Zhang et al., 2025). Paralelamente, la aplicación de modelos de aprendizaje automático está revolucionando la optimización de estos procesos. Recientemente, (Madadi et al., 2025) propusieron un modelo basado en regresión aumentada por gradiente que demostró un alto poder predictivo (R^2 entre 0,71 y 0,94) y bajos errores reduciendo significativamente el tiempo y los costos experimentales.

De manera complementaria, Smuga et al., (2021) desarrollaron un modelo híbrido que integra redes neuronales artificiales y bosques aleatorios, alcanzando un ajuste de $R^2 = 0,961$ para predecir la producción de bioetanol a partir de biomasa pretratada con líquidos iónicos. Este modelo permite la clasificación preliminar de plantas según su composición lignocelulósica, facilitando la selección de materias primas adecuadas.

El uso de la IA resulta especialmente ventajoso en este aspecto, ya que, como demuestran los resultados anteriores, permite predecir los resultados con alta precisión mientras minimiza significativamente los costos experimentales, optimizando así el desarrollo de procesos sostenibles para la producción de bioetanol.

3.3. Hidrólisis enzimática

En la naturaleza, la biodegradación de la biomasa de la planta es un proceso lento porque la lignina restringe el acceso de enzimas hidrolíticas a los polisacáridos. Por esta razón, se requieren pretratamientos que modifiquen la estructura del material lignocelulósico para hacerlo accesible a la hidrólisis y fermentación. La integración de técnicas innovadoras, como el pretratamiento asistido por ultrasonidos, mejora la actividad enzimática y el rendimiento de azúcares (Dongmo et al., 2024).

La selección adecuada de enzimas celulolíticas es fundamental para la conversión de biomasa en biocombustibles, una vía prometedora para la producción de energía sostenible. No obstante, su alto costo representa un cuello de botella para la viabilidad comercial del proceso. En respuesta, se han explorado estrategias innovadoras para reciclar y reutilizar celulasas, con el objetivo de mitigar los costos de producción y hacer el proceso más sostenible para aplicaciones industriales.

Una alternativa para reducir los costos de la hidrólisis enzimática es la producción de enzimas a partir de microorganismos autóctonos y su mezcla con enzimas comerciales ya que poseen elevados costos en el mercado. Serrano et al., (2024) estudiaron la

factibilidad de reemplazar parcialmente enzimas comerciales por cocteles enzimáticos nativos de *Bacillus subtilis* aislado en Ecuador, determinando que la mezcla óptima fue 63,5% de enzima comercial y 36,5% de enzima nativa. El aislamiento, purificación y manejo de microorganismos productores de cocteles enzimáticos permite mejorar los rendimientos de glucosa y reducir costos.

La integración de la IA constituye una ventaja estratégica al permitir la optimización simultánea de múltiples variables del proceso. Los algoritmos de aprendizaje automático facilitan la selección inteligente de mezclas enzimáticas y la identificación de estrategias de reciclaje efectivas. Esta capacidad predictiva se extiende al diseño de biocatalizadores mejorados y a la integración de enfoques enzimáticos y termoquímicos, posicionando a la IA como habilitador clave para superar las limitaciones actuales.

3.4. Desarrollo y desafíos del concepto de biorrefinería

La comunidad científica colabora activamente en la sustitución de compuestos de origen fósil dentro de la infraestructura industrial existente. Este esfuerzo trasciende la mera sustitución de fuentes de combustible y requiere una planificación estratégica para reemplazar los diversos productos e insumos que actualmente dependen de combustibles fósiles. Se propone el desarrollo de biorrefinerías como una vía prometedora para abordar este desafío.

Se han realizado estudios para el desarrollo de biorrefinerías en la región central de Cuba, destacándose la transformación del Polo Heriberto-Chiquitico, Perúcho Figueredo. Este desarrollo requiere la producción de bioetanol y xilitol como elementos fundamentales para la cadena productiva. Recientemente (Consuegra et al., 2022) han diseñado las capacidades productivas para una planta de xilitol, compuesto con aplicaciones relevantes en las industrias alimentaria, farmacéutica y odontológica. Paralelamente, se ha avanzado en el diseño tecnológico para bioetanol, donde (Gomes-da Silva et al., 2022) evalúan las alternativas más viables para su producción.. Debido a esto en el 2021 se realizaron estudios de preinversión para la producción conjunta de furfural-etanol y tableros a partir de bagazo de caña de azúcar, con el objetivo de adaptar tecnologías de obtención de etanol en un sistema integrado (Morales et al., 2021). Cabe destacar que (Sánchez et al., 2024) evaluaron recientemente el riesgo inversionista de propuestas de negocio para el desarrollo de biorrefinerías en empresas azucareras cubanas, estableciendo bases para su implementación en el país.

La integración de fábricas de azúcar como biorrefinerías permite obtener diversos subproductos de valor agregado, como torula, biocombustibles, biogás, fertilizantes, nanopartículas de lignina, diluyentes y saborizantes. El biogás, obtenido a partir de biomasa lignocelulósica derivada de residuos de destilería, industriales y agrícolas, se utiliza para la generación de calor y electricidad. Su integración con instalaciones de bioetanol optimiza la utilización de recursos, reduce los residuos del proceso y mejora la eficiencia energética global (Woźniak et al., 2025).

Con este fin la bioeconomía circular ha cobrado relevancia como alternativa sostenible a las fuentes de energía convencionales, con especial atención en la obtención de productos de alto valor agregado a partir de biomasa lignocelulósica En este contexto, las biorrefinerías emergen como un modelo integral que combina equipos y sistemas de proceso para transformar biomasa en biocombustibles, productos químicos,

biomateriales e intermediarios, reduciendo el impacto ambiental asociado al consumo de hidrocarburos y promoviendo el uso de recursos renovables.

Estos procesos deben ser económica y ambientalmente competitivos frente a las alternativas basadas en combustibles fósiles, abordando preocupaciones globales como el cambio climático y la seguridad energética. A nivel mundial, la biomasa representa la cuarta fuente de energía más utilizada, después del petróleo, carbón y gas natural.

Las biorrefinerías de lignocelulosa son fundamentales para desarrollar métodos sostenibles de producción de biocombustibles y bioquímicos. Estas permiten avanzar hacia la neutralidad de carbono mediante la valorización de residuos agrícolas y forestales, a través de tres etapas principales: producción de azúcares lignocelulósicos, hidrólisis enzimática y fermentación de azúcares mixtos. Este modelo circular prioriza la eficiencia en el uso de recursos, la minimización de residuos y la gestión sostenible, transitando hacia sistemas regenerativos.

La caña de azúcar se posiciona como materia prima promisoria para este enfoque de biorrefinería. Países como Tailandia apuestan por explorar su potencial no solo para mitigar impactos ambientales, sino también para generar productos de valor agregado. Como parte de las estrategias de bioeconomía circular, se espera que la industria azucarera contribuya significativamente más allá de la producción tradicional de azúcar y etanol, incursionando en la fabricación de bioquímicos y bioplásticos (Lin et al., 2025).

La transferencia de tecnología desde países industrializados hacia naciones en desarrollo representa un aspecto crítico que requiere gestión estratégica, particularmente para países con recursos tecnológicos limitados. A pesar de los avances tecnológicos, persiste la necesidad de incrementar los rendimientos de bioetanol y reducir costos de producción mediante la integración de procesos. Investigaciones como las de (Albernas et al., 2017) han desarrollado marcos matemáticos para optimizar el diseño de etapas de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar, permitiendo el análisis de diversos escenarios productivos. El diseño de procesos discontinuos resulta esencial para etapas críticas, ya que facilita el control de condiciones operativas, reduce riesgos técnico-económicos y permite la validación de nuevas enzimas o microorganismos. Complementariamente, (Albernas et al., 2012) desarrollaron una metodología para la síntesis y diseño óptimo de plantas discontinuas aplicada específicamente al proceso de obtención de etanol a partir de bagazo de caña de azúcar. Debido a esto la figura 1 muestra una estrategia para la obtención de bioetanol con concepto de biorrefinería.

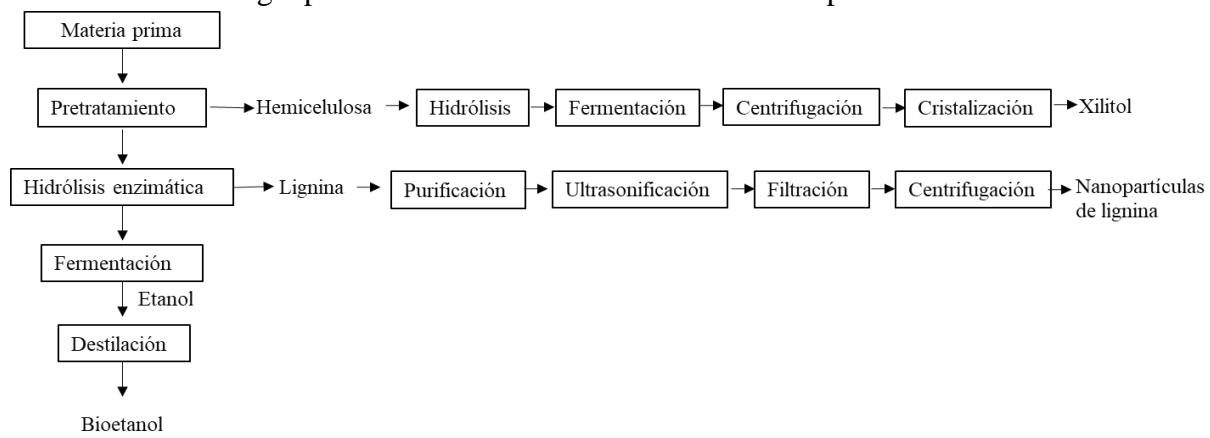


Figura 1. Estrategia de producción de bioetanol en el marco de biorrefinería

Las biorrefinerías de biomasa lignocelulósica enfrentan desafíos significativos que limitan su implementación a escala industrial, principalmente en optimización de procesos y desarrollo de cepas microbianas. La complejidad operacional deriva de la multiplicidad de unidades de proceso con características diversas y de la necesidad de su integración efectiva. El alto costo de las celulosas y la carencia de cepas robustas para fermentar azúcares mixtos en condiciones inhibitorias destacan la necesidad de desarrollar microorganismos resistentes (Huang et al., 2025 b). Ante estos retos, se requiere investigar combinaciones de microorganismos nativos para producir enzimas y cocteles específicos que permitan reducir costos de producción.

Para enfrentar estos desafíos, la integración de (IA) emerge como una herramienta prometedora para potenciar las biorrefinerías y facilitar su penetración en el mercado, impulsando modelos productivos más circulares y sostenibles (Arias et al., 2023). Las denominadas "biorrefinerías inteligentes" utilizan herramientas de IA para analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar resultados precisos que mejoran la productividad de los procesos de base biológica.

Esta tecnología optimiza el uso de recursos mediante la selección de etapas productivas y condiciones operativas ideales, mejora la calidad del producto mediante monitoreo preciso de parámetros y reduce la generación de residuos. En casos de investigaciones novedosas con limitada disponibilidad de datos, las simulaciones basadas en datos de laboratorio permiten proyectar escalamientos industriales, facilitando la transición hacia implementaciones comerciales mediante el desarrollo de modelos predictivos.

Cabe destacar que cada técnica de aprendizaje automático presenta ventajas y limitaciones específicas (Tabla 3), por lo que la selección del método más adecuado para cada caso de estudio resulta fundamental.

Tabla 3. Ventajas y limitaciones de las variantes de técnicas de aprendizaje automático (Owusu & Marfo 2023)

Técnica	Ventajas	Limitaciones
RNA	Detecta relaciones no lineales complejas entre variables. Versátil para los problemas de clasificación/ regresión. Diversos algoritmos de entrenamiento.	Las variables independientes necesitan procesamiento. Complejo y computacionalmente costoso.
BR	Escalable y adaptable a grandes conjuntos de datos Versátil para problemas de clasificación y regresión Fácil de implementar Capacidad para estimar variables importantes en la clasificación	Convergencia lenta Complejo y computacionalmente costoso.
SVM	Alta robustez y generalización: Menor riesgo de sobreajuste, asegurando mayor confiabilidad en las predicciones. Escalable para grandes conjuntos de datos Versátil para problemas de clasificación y	Costoso computacionalmente por la gran cantidad de datos Rendimientos deficientes para datos con ruido.

	regresión.	
BN	Eficaz para los problemas probabilísticos. Fácil predicción de la relación entre múltiples y variables.	No adecuado para la mayoría de problemas de regresión.

Las RNA constituyen uno de los modelos computacionales más empleados para la digitalización de procesos permitiendo resolver problemas complejos difíciles de abordar mediante programación convencional basada en reglas. Inspirado en estructuras celulares niales, este método transforma un conjunto de parámetros de entrada en variables de salida a través de conexiones neuronales interrelacionadas (Olajuyin et al., 2022).

El contexto de la producción de bioetanol, las RNA presentan especial relevancia para el modelado y optimización. Esta aplicabilidad se deriva de su flexibilidad algorítmica y alta tolerancia al error en las etapas no lineales y complejas. Al compararse con las otras técnicas de IA, las RNA demuestran mayor precisión predictiva, con valores de R^2 entre 0,91 y 0,99. Esta superioridad se manifiesta particularmente frente a metodologías como la superficie de respuesta (RSM) y el bosque aleatorio. Mientras la RSM es valorada por su capacidad para diseñar experimentos, construir modelos y evaluar interacciones entre variables (Huang et al., 2025 a), las RNA han demostrado ser herramientas de modelado más robustas y superiores, especialmente ante escenarios de alta complejidad y no linealidad en los parámetros del proceso. Su reconocimiento deriva de su capacidad para predecir las concentraciones finales de etanol (Niaze et al., 2023) y modelar variables críticas como biomasa, sustrato y concentraciones de producto en procesos de fermentación alcohólica, optimizando las condiciones operativas para maximizar los rendimientos.

Sin embargo, las RNA se consideran modelos de "caja negra" debido a su limitada capacidad para explicar la influencia relativa de las variables independientes en el proceso predictivo. Esta falta de interpretabilidad representa una desventaja significativa en investigación, donde es crucial comprender las relaciones subyacentes en los fenómenos bioquímicos dinámicos. Para abordar esta limitación, se han desarrollado diversos métodos interpretativos (pesos de conexión, algoritmo de Garson, análisis de sensibilidad, etc.) mediante lenguajes de programación como MATLAB y Python, que permiten elucidar la contribución específica de las variables en las redes neuronales (Dave et al., 2021).

El uso de estas técnicas de IA es de gran utilidad ya que tienen la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos operativos, su gran capacidad de modelado predictivo facilita su escalamiento a nivel industrial reduciendo los riesgos inversionistas. No obstante, su implementación en estudios futuros no solo garantizará la robustez en los modelos, sino que también una significativa reducción de costos y tiempos durante el desarrollo del proceso.

4. CONCLUSIONES

1. La inteligencia artificial permite optimizar la producción de bioetanol mediante la selección precisa de biomasa y predicción de mezclas, reduciendo costos.

2. La eficiencia del pretratamiento se logra con la combinación de las técnicas de aprendizaje automático para un mayor rendimiento del proceso.
3. La inteligencia artificial mejora la hidrólisis enzimática mediante la selección de mezclas enzimáticas eficaces y el diseño de estrategias de reciclaje, lo que disminuye los costos y favorece la producción sostenible de bioetanol a escala industrial.
4. Con la técnica de RNA mediante softwares como MATLAB y Python se puede modelar las principales variables (biomasa, sustrato y concentraciones de producto) en el proceso de fermentación alcohólica para predecir las condiciones óptimas garantizando un mayor rendimiento de etanol.
5. La combinación de microorganismos locales, optimización basada en RNA y metodologías de operaciones discontinuas constituye un marco innovador para biorrefinerías competitivas, especialmente en economías emergentes con alta disponibilidad de residuos agrícolas.

REFERENCIAS

- Albernas, Y., Corsano, G., González, M., González, E., & Verelst, H. (2012). Procedimiento para la síntesis y diseño óptimo de plantas discontinuas (Parte I). *Tecnología Química*, 32(3), 257-264. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543777005>
- Albernas, Y., González, M., González, E. & Corsano, G. (2017). Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from sugar cane bagasse. *Chemical Engineering Research and Design*, 126(1), 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.08.029>
- Arias, A., Feijoo, G. & Moreira, M.T. (2023). How could Artificial Intelligence be used to increase the potential of biorefineries in the near future. *Environmental Technology & Innovation*, 32(1), 103277. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103277>
- Brlekovic, F., Muzina, K. & Kurajica, S. (2024). The influence of alkaline pretreatment of waste nutshell for use in particulate biocomposites. *Journal of Composites Science*, 8(1), 26. <https://doi.org/10.3390/jcs8010026>
- Consuegra, L., González, E. & Albernas, Y. (2022). Determinación de las capacidades óptimas de producción de xilitol extrayendo jugo de los filtros en un central azucarero. *Centro Azúcar*, 49(2), 85-89. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/704
- Corea, G. & García, P. (2019). *Análisis del proceso de obtención de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar, por hidrólisis ácida diluida, fermentación separada*. [Tesis de grado para el título de Licenciado en Química Industrial. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/13595>
- Dave, N., Varadavenkatesan, T., Selvaraj, R. & Vinayagam, R. (2021). Modelización de la producción fermentativa de bioetanol a partir de biomasa autóctona de *Ulva* prolifera por *Saccharomyces cerevisiae* NFCCI1248 utilizando un enfoque integrado de ANN-GA. *Science of The Total Environment*, 791(1), 148429.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148429>
- Díez, C. (2014). Obtención de bioetanol 2G a partir de hidrolizados de paja de trigo. Fermentación conjunta con pichia stipitis. [Tesis doctoral de la universidad de Valladolid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=294644>
- Domínguez, M., Álvarez, A. & Granados, M. (2012). Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(4), 200-211. <https://www.observatorioplastico.com/ficheros/articulos/138613200207070735.pdf>
- Dongmo, D., Ngouanwou, M., Atemkeng, C. & Ngomade, S. (2024). Bioethanol production from cocoa hydrolysate and the assessment of its environmental sustainability. *Heliyon*, 10(3), e25809. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25809>
- Ghazali, M. & Mustafa, M. (2025). Bioethanol as an alternative fuel: A review on production strategies and technique for analysis. *Energy Conversion and Management*, 26(1), 100933. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100933>
- Gomes-da Silva, Z., Gálvez, L., Gómez, A., Julián, M. & Ramos, L. (2022). Análisis de alternativas tecnológicas de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña. *Centro Azúcar*, 49(2), 15-25. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/698
- Göncü, B., Sarıışık, G. & Hoşgün, E. (2025). Valorization of lignocellulosic feedstock in bioethanol production via separate hydrolysis and fermentation: An integrated machine learning approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 142(1), 1039-1053. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.340>
- Holguín, J., Peña, D., Ríos, L. & Velázquez, M. (2017). Bagazo de sorgo dulce: una alternativa para la producción de etanol de segunda generación en Colombia. *Informador Técnico*, 81(2), 131-141. <http://doi.org/10.23850/22565035.82>
- Huang, J., Guo, Q., Li, X. & Shi, T. (2025 a). A comprehensive review on the application of neural network model in microbial fermentation. *Bioresource Technology*, 416(1), 131801. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131801>
- Huang, X., Zhang, X., Xing, L., Huang, C., Hu, X. & Liu, C. (2025 b). Promoting lignocellulosic biorefinery by machine learning: progress, perspectives and challenges. *Bioresource Technology*, 428(1), 132434. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132434>
- Kim, I., Lee, B., Park, J., Choi, S. & Han, J. (2014). Effect of nitric acid on pretreatment and fermentation for enhancing ethanol production of rice straw. *Carbohydrate Polymers*, 99(1), 563-567. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.092>
- Lin, S., Holden, N., Thongdara, R., Silalertruksa, T., Gheewala, S. & Prapaspong, T. (2025). Circular economy models of sugarcane biorefinery towards carbon neutrality and environmental sustainability. *Sustainable Production and Consumption*, 59, 305-3024. <http://doi.org/10.1016/j.spc.2025.07.008>
- Madadi, M., Kargaran, E., Zhang, E. & Sun, F. (2025). Machine learning-driven optimization of biphasic pretreatment conditions for enhanced lignocellulosic biomass fractionation. *Energy*, 326(1), 136241.

<http://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136241>

Mesa, L., Martínez, Y., Barrio, E. & González, E. (2017). Desirability function for optimization of dilute acid pretreatment of sugarcane straw for ethanol production and preliminary economic analysis based in three fermentation configurations. *Applied Energy*, 198(1), 299-311.
<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.018>

Morales, N. (2024). *Uso de biomasa residual de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), maíz (*Zea mays*) y bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y su impacto en la conservación del medio ambiente.* [Tesis de grado de la Universidad de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16073>

Morales, M., Mesa, L., Ley, N., Armas, A., Acosta, D. & González, E. (2021). Estudios previo inversionistas para la producción de furfural-etanol y tableros a partir de bagazo de caña de azúcar. *Revista ION*, 34(2), 17-29.
<https://www.redalyc.org/journal/3420/342070411002>

Morejón, H. & Llano, J. (2025). Optimización en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica: métodos y tecnologías sostenibles. [Tesis de grado de la Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29722/1/TTQ1972>

Niaze, A., Sahu, R., Sunkara, M. & Upadhyayula, S. (2023). Model construction and optimization for raising the concentration of industrial bioethanol production by using a data-driven ANN model. *Renewable Energy*, 216(1), 119031.
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119031>

Olajuyin, E., Olulope, P. & Fasina, E. (2022). An overview on reliability assessment in power systems using CI approaches. *Archives of Electrical Engineering*, 71(2), 425-443. <http://doi.org/10.24425/aee.2022.140720>

Owusu, W. & Marfo, S. (2023). Artificial Intelligence application in bioethanol production. *International Journal of Energy Research*, 17(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1155/2023/7844835>

Palacios, S., Ruiz, H., Ramos, R., Martínez, J., Segura, E., Aguilar, M., Aguilera, A., Michelena, G., Aguilar, C. & Ilyina, A. (2017). Comparison of physicochemical pretreatments of banana peels for bioethanol production. *Food Science and Biotechnology*, 26(4), 993–1001. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0128-9>

Punia, P. & Kumar, S. (2025). A critical review on enhanced bioethanol production from sweet sorghum using nanotechnology. *Energy Nexus*, 17(1), 100339.
<http://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100339>

Raud, M., Rocha, L., Lane, D. & Sippula, O. (2021). Utilization of barley straw as feedstock for the production of different energy vectors. *Processes*, 9(4), 726.
<http://doi.org/10.3390/pr9040726>

Sánchez, E., González, E. & Sánchez, A. (2024). Secuencia inversionista en oportunidades de negocios del desarrollo de una fábrica de azúcar como biorrefinería. *Centro Azúcar*, 51(4), e1090.
https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/823

Serrano, J., Salvador, P., González, E. & Albernas, Y. (2024). Mezcla óptima de enzimas comerciales y autóctonas para la hidrólisis en el desarrollo sinérgico de la industria química y las biorrefinerías. *Bionatura*, 9(2), 168-185.

- <https://www.revistabionatura.org/wp-content/uploads/2024/06/11-Articulo-v2.pdf>
- Smuga, M., Kougut, T., Markiewiez, R. & Slowik, A. (2021). Use of machine learning methods to predict the amount of bioethanol obtained from lignocellulosic biomass through the use of ionic liquids for pretreatment. *Energy*, 14(1), 243. <https://doi.org/10.3390/en14010243>
- Woźniak, A. (2025). Review of lignocellulosic biomass pretreatment using physical, thermal and chemical methods for higher yields in bioethanol production. *Sustainability*, 17(1), 287. <http://doi.org/10.3390/su17010287>
- Zhang, X. (2025). Research progress of deep eutectic solvents in lignocellulosic biomass pretreatment. *Cellulose*, 32(8), 4637-4650. <http://doi.org/10.1007/s10570-025-06553-4>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Sheila María Acosta Rodríguez. Análisis formal, investigación, redacción - primera redacción, redacción- revisión y edición.
- Ing. Jennifer Álvarez García. Redacción- revisión y edición, conceptualización.
- Lic. Rosario Claudia Almodobal Ramos. Redacción- revisión y edición.
- Dr.C. Yailet Albernas Carvajal. Supervisión, investigación, análisis formal, redacción- revisión y edición.
- Dr.C. Ronaldo Francisco Santos Herrero. Redacción- revisión y edición.