Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Pasado, presente y futuro del PSE y sus aplicaciones"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

LA INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS EN LA TRANSICIÓN HACIA BIOCOMBUSTIBLES VERDES: ANÁLISIS DE TENDENCIAS TECNOLÓGICAS Y DESAFÍOS FUTUROS

Juan José Quiroz-Ramírez [a*], Israel Aguilera Navarrete [a] , Sergio Alonso Romero [c]
Eduardo Sánchez- Ramírez [b], Juan Gabriel Segovia-Hernández [b]

[a] SECIHTI-CIATEC, Dirección de Investigación Aplicada y Desarrollo, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Calle Omega 201, León, Guanajuato, México, C.P. 37545.
jquiroz@ciatec.mx

[b] Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta s/n, Guanajuato, México, C.P. 36050

[c] CIATEC, Dirección de Investigación Aplicada y Desarrollo, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, Calle Omega 201, León, Guanajuato, México, C.P. 37545.

Resumen

La Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) representa un enfoque clave para apoyar la transición hacia biocombustibles verdes, al integrar herramientas de modelado, simulación, optimización y evaluación ambiental. Este estudio tiene como objetivo analizar la evolución científica del PSE aplicado a biocombustibles verdes mediante una revisión bibliométrica de 389 documentos publicados entre 2003 y 2026, complementada con un análisis crítico de sus metodologías, aplicaciones y tendencias emergentes. Los resultados muestran un crecimiento sostenido de la producción científica, una concentración relevante en revistas especializadas de alto impacto y redes de colaboración internacional vinculadas con autores influyentes, en síntesis, optimización e integración de procesos. El análisis temático indica que el campo se organiza principalmente alrededor de la conversión de biomasa, la eficiencia energética, la evaluación ambiental mediante Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y las tecnologías orientadas a reducir emisiones. También se observa una transición hacia enfoques digitales basados en inteligencia artificial, modelos

híbridos y gemelos digitales, los cuales fortalecen el diseño y la operación de biorefinerías más flexibles. Entre los principales desafíos se identifican la variabilidad de la biomasa, el alto consumo energético en separaciones, el escalado industrial de rutas emergentes y la integración con hidrógeno verde y captura de CO_2. En conjunto, el PSE se posiciona como una herramienta estratégica para evaluar y mejorar la viabilidad técnica, ambiental y económica de los biocombustibles verdes.

Palabras clave: PSE (Process Systems Engineering), Biocombustibles verdes, Bibliometría, Biorefinerías, sostenibilidad.

Process Systems Engineering in the Transition Toward Green Biofuels: Technological Trends and Future Challenges

Abstract

Process Systems Engineering (PSE) represents a key approach to supporting the transition toward green biofuels by integrating modeling, simulation, optimization, and environmental assessment tools. This study aims to analyze the scientific evolution of PSE applied to green biofuels through a bibliometric review of 389 documents published between 2003 and 2026, complemented by a critical analysis of its methodologies, applications, and emerging trends. The results show sustained growth in scientific production, a relevant concentration in specialized high-impact journals, and international collaboration networks linked to influential authors in process synthesis, optimization, and integration. The thematic analysis indicates that the field is mainly organized around biomass conversion, energy efficiency, environmental assessment through Life Cycle Assessment (LCA), and technologies aimed at reducing emissions. A transition toward digital approaches based on artificial intelligence, hybrid models, and digital twins is also observed, strengthening the design and operation of more flexible biorefineries. The main challenges identified include biomass variability, high energy consumption in separation processes, industrial scale-up of emerging pathways, and integration with green hydrogen and CO_2 capture. Overall, PSE is positioned as a strategic tool for evaluating and improving the technical, environmental, and economic feasibility of green biofuels.

Keywords: PSE (Process Systems Engineering), green biofuels, bibliometrics, biorefineries, sustainability.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Introducción

La transición energética ha puesto en primer plano la necesidad de desarrollar procesos más limpios, eficientes y sostenibles. En este contexto, los biocombustibles verdes representan una alternativa relevante para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y reducir impactos ambientales asociados a los sistemas energéticos actuales. Sin embargo, su desarrollo no depende únicamente de contar con materias primas renovables, sino también de diseñar procesos capaces de responder a retos técnicos, económicos y ambientales cada vez más exigentes.

La Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) ofrece herramientas útiles para enfrentar esta complejidad, ya que permite integrar el modelado, la simulación, la optimización y la evaluación ambiental en el análisis de procesos químicos y energéticos. Su aplicación resulta especialmente importante en el campo de los biocombustibles verdes, donde las rutas de conversión, la variabilidad de la biomasa y las condiciones de operación requieren enfoques capaces de analizar el sistema de forma integral y no como etapas aisladas (Zhang y col., 2022; Bazargan y col., 2022).

Aunque en los últimos años se ha incrementado el interés científico por el PSE aplicado a biocombustibles, la literatura aún se encuentra dispersa entre estudios bibliométricos, revisiones tecnológicas y trabajos enfocados en metodologías específicas. Esta dispersión dificulta identificar con claridad cómo ha evolucionado el campo, cuáles son sus principales líneas de investigación y qué papel desempeña el PSE en la transición hacia procesos bioenergéticos más viables. Estudios previos han mostrado la utilidad de los análisis bibliométricos para reconocer tendencias científicas, redes de colaboración y áreas emergentes en tecnologías sostenibles y sistemas energéticos (Azad & Parvin, 2022; Funko y col., 2023; Mühl & de Oliveira, 2022).

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar la evolución científica del PSE aplicado a biocombustibles verdes mediante un análisis bibliométrico de 389 documentos publicados entre 2003 y 2026, complementado con una revisión crítica de sus metodologías, aplicaciones y tendencias principales. Con este enfoque se busca ordenar la información disponible y ofrecer una lectura integrada del campo, desde su crecimiento académico hasta

su aporte en el diseño y evaluación de procesos orientados a la sostenibilidad.

La principal contribución del estudio consiste en reunir, en un mismo análisis, la evidencia bibliométrica y la discusión técnica sobre el papel del PSE en los biocombustibles verdes. A diferencia de trabajos centrados solo en métricas de publicación o en tecnologías particulares, este artículo articula la evolución científica del área con sus enfoques metodológicos, sus aplicaciones y sus retos de desarrollo. De esta manera, se aporta una visión más clara sobre cómo el PSE puede apoyar la toma de decisiones, la mejora de procesos y la transición hacia sistemas energéticos de menor impacto ambiental (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022; Nabgan y col., 2023; Yang y col., 2020).

2. Metodología del análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se aplicó para examinar la evolución científica, las redes de colaboración y las tendencias temáticas del campo de la Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) en el contexto de los biocombustibles verdes. Este enfoque permite caracterizar el volumen de producción científica, la estructura intelectual y la dinámica de crecimiento, tal como se ha demostrado en estudios recientes aplicados a diversos campos tecnológicos y ambientales (Azad & Parvin, 2022; Ghosh y col., 2022; Secinaro y col., 2020). La bibliometría presenta ventajas al permitir el análisis de grandes conjuntos de información, aunque también introduce desafíos relacionados con la formulación de ecuaciones de búsqueda, sesgos lingüísticos, diferencias en criterios de indexación y depuración de metadatos, aspectos ampliamente reconocidos en la literatura metodológica (Omotehinwa, 2022; Olaleye y col., 2023).

Para aumentar la confiabilidad del análisis, se empleó un proceso sistematizado compuesto por cuatro fases: (1) construcción de la ecuación de búsqueda; (2) recuperación de registros en bases de datos; (3) estandarización y limpieza de metadatos; y (4) análisis estadístico, estructural y visual mediante herramientas computacionales. Este procedimiento es consistente con las metodologías bibliométricas aplicadas en estudios recientes sobre energías renovables, sistemas inteligentes y tecnologías emergentes (Zhang y col., 2022; Pang & Shen, 2022; Gonçalves y col., 2023). La Figura 1 muestra una representación gráfica del flujo del proceso bibliométrico para el Análisis de tendencias aquí presentadas.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

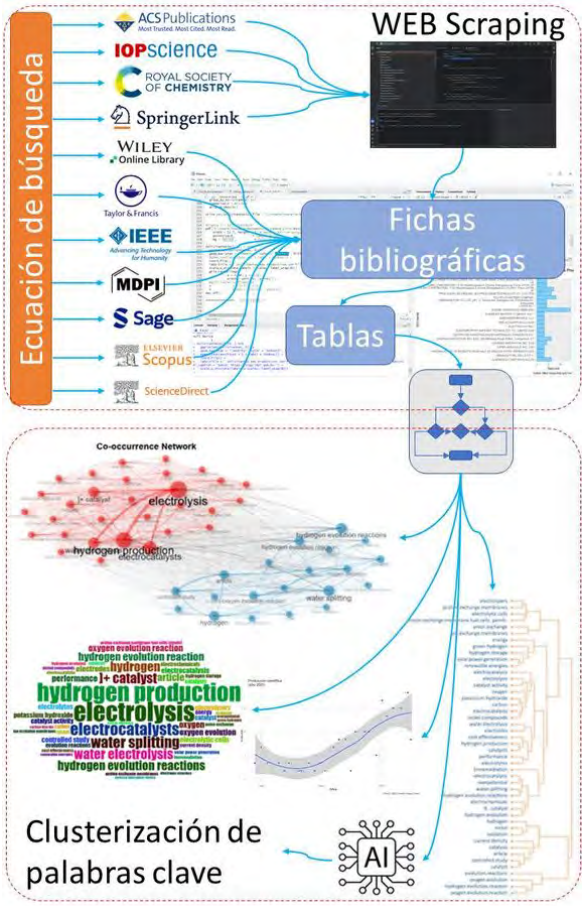


Figura 1. Representación gráfica del flujo del proceso bibliométrico para el Análisis de tendencias tecnológicas y desafíos futuros.

2.1. Estrategia de búsqueda

La ecuación de búsqueda se diseñó con el fin de recuperar literatura relevante sobre el PSE aplicado a sostenibilidad, bioenergía y biocombustibles verdes. Se utilizó la expresión TITLE-ABS-KEY:

(("Process Systems Engineering" OR PSE) AND (bio OR green OR eco OR "sustainable development" OR biofuel) AND fuel)

Esta estrategia permitió identificar documentos centrados en modelado, optimización, simulación, diseño y evaluación ambiental de procesos bioenergéticos. La selección de palabras clave se alineó con prácticas bibliométricas consolidadas en investigaciones recientes sobre tecnologías limpias, ingeniería de procesos, sistemas inteligentes y energías renovables (Zhang y col., 2022; Turulja y col., 2023; Quesado & Silva, 2021).

Para ampliar la cobertura temática se consultaron diversas bases de datos científicas, entre ellas Scopus, SpringerLink, MDPI, SAGE Journals, Taylor & Francis, ScienceDirect, ACS Publications, Wiley, IOPscience, Royal Society of Chemistry e IEEE Xplore. Estas bases se seleccionaron siguiendo criterios de exhaustividad y calidad de indexación empleados en estudios bibliométricos contemporáneos (Nabgan y col., 2023; Gutiérrez-Nieto y col., 2023).

El periodo analizado abarca 2003–2026 y produjo un conjunto final de 389 documentos, distribuidos en 70 revistas, elaborados por 1152 autores. La amplitud de la base documental con rangos utilizados en análisis bibliométricos de otras áreas tecnológicas, donde se han estudiado conjuntos entre 200 y

1000 artículos para caracterizar la evolución científica de un campo (Azad & Parvin, 2022; Olaleye y col., 2023).

2.2. Procesamiento y depuración de datos

La depuración de los metadatos incluyó la eliminación de duplicados, la estandarización de nombres de autores e instituciones, la normalización de las fuentes y la corrección manual de inconsistencias generadas durante la exportación. Estos pasos son esenciales en estudios bibliométricos y son ampliamente documentados en investigaciones recientes sobre ingeniería, ciencias ambientales y energías renovables (Ghosh y col., 2022; Gonçalves y col., 2023).

El análisis se llevó a cabo en RStudio® utilizando los paquetes bibliometrix e igraph, herramientas reconocidas por su capacidad para gestionar, analizar y visualizar grandes conjuntos de datos bibliográficos (Nabgan y col., 2023; Pang & Shen, 2022). Estas herramientas permitieron generar redes de coautoría, mapas de coocurrencia de palabras clave, distribuciones temporales de productividad, análisis de acoplamiento bibliográfico y estructuras temáticas. Posteriormente, los resultados fueron exportados para su representación gráfica.

2.3 Limitaciones inherentes al método

El análisis bibliométrico presenta limitaciones ampliamente reconocidas en la literatura especializada. Entre ellas se encuentran la dependencia de una única ecuación de búsqueda, que puede excluir documentos que emplean terminologías diferentes; el sesgo lingüístico hacia publicaciones en inglés, predominante en las bases consultadas; la variabilidad en los criterios editoriales entre plataformas; y la imposibilidad de realizar inferencias cualitativas profundas, dado que el enfoque se centra principalmente en métricas cuantitativas (Secinaro y col., 2020; Gutiérrez-Nieto y col., 2023).

A pesar de estas restricciones, el procedimiento aplicado garantiza una caracterización sólida y representativa del desarrollo científico del PSE en el ámbito de los biocombustibles verdes, coherente con las prácticas recomendadas en bibliometría contemporánea (Azad & Parvin, 2022; Zhang y col., 2022).

3. Resultados del análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico permitió revisar la evolución científica de la Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

biocombustibles verdes, tomando como base un base documental conformado por 389 documentos, publicados en 70 revistas y asociados a 1152 autores, durante el periodo 2003–2026. A partir de esta información fue posible organizar el análisis en torno a la producción científica del campo, las fuentes editoriales más relevantes, la participación de autores y redes de colaboración, así como las principales líneas temáticas que han orientado el desarrollo del área. Este tipo de aproximación ha sido utilizado en estudios bibliométricos recientes sobre energías renovables, inteligencia artificial y sistemas tecnológicos emergentes (Zhang y col., 2022; Azad & Parvin, 2022; Pang & Shen, 2022).

Con base en este conjunto documental, la sección se estructura en cinco apartados que permiten presentar los resultados de forma ordenada: crecimiento de la producción científica, revistas y fuentes más productivas, autores y redes de colaboración, dinámica conceptual de las palabras clave y estructura jerárquica de las áreas temáticas dentro del PSE aplicado a biocombustibles verdes. Esta organización busca evitar repeticiones innecesarias y dejar que cada subsección desarrolle sus propios hallazgos con mayor detalle. Además, permite mantener una lectura más clara y progresiva, en línea con estudios bibliométricos previos realizados en campos relacionados con tecnologías sostenibles, sistemas energéticos y aplicaciones digitales (Ghosh y col., 2022; Gonçalves y col., 2023; Secinaro y col., 2020).

3.1. Crecimiento de la producción científica en PSE y biocombustibles verdes

La producción científica sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes muestra una tendencia ascendente durante el periodo 2003–2026. Como se observa en la Figura 2, los primeros años presentan una actividad limitada, mientras que en la etapa más reciente se registra un aumento claro en el número de publicaciones anuales, con valores superiores a cuarenta documentos por año. Este comportamiento sugiere un interés creciente por aplicar herramientas de PSE al estudio, diseño y evaluación de procesos relacionados con la conversión de biomasa y la producción de biocombustibles. Esta tendencia es consistente con lo reportado en otros estudios bibliométricos sobre energía, sostenibilidad y tecnologías emergentes, donde el crecimiento de publicaciones suele asociarse con la consolidación gradual de nuevas áreas de investigación (Azad y Parvin,

2022; Zhang y col., 2022; Bazargan y col., 2022).

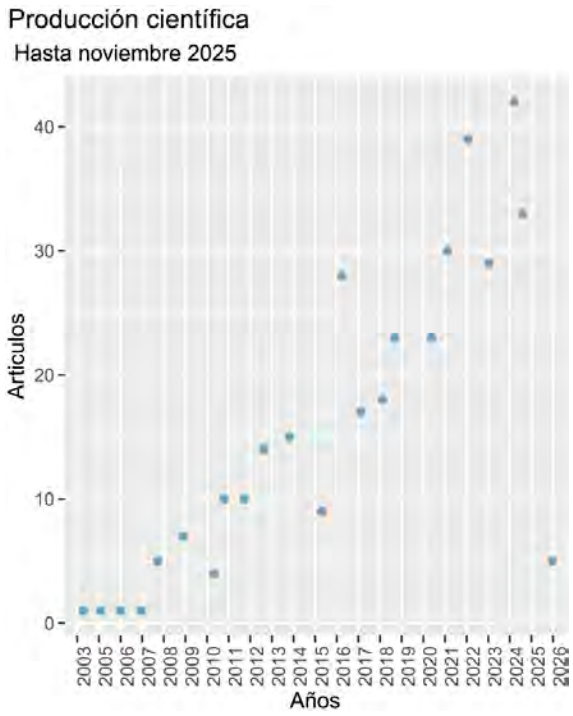


Figura 2. Producción científica anual sobre PSE aplicado a biocombustibles verdes, obtenida mediante la ecuación de búsqueda en Scopus, ScienceDirect, Springer, SAGE, Taylor & Francis, ACS, IEEE, IOP, Wiley y MDPI.

La Figura 3 complementa este análisis al mostrar la distribución de publicaciones entre las revistas más destacadas. Se observa una presencia importante de títulos especializados en energía, ingeniería de procesos, producción limpia y sostenibilidad, como Applied Energy, Energy Conversion and Management, Journal of Cleaner Production y Renewable and Sustainable Energy Reviews. Más que asumir por sí sola una mayor calidad científica, esta distribución permite identificar los principales espacios editoriales donde se ha difundido la investigación sobre PSE y biocombustibles verdes. Este patrón coincide con revisiones bibliométricas recientes que ubican a las áreas de energía, medio ambiente e ingeniería como núcleos frecuentes de publicación en temas asociados con transición energética y tecnologías sostenibles (Funko y col., 2023; Mühl y de Oliveira, 2022; Nabgan y col., 2023).

Por su parte, la Figura 4 permite observar la evolución temporal de la producción en las revistas más representativas. Además del crecimiento general, se identifican periodos de mayor actividad, especialmente entre 2018–2021 y 2023–2025. Estos incrementos no deben interpretarse como resultado de una sola causa, sino como parte de un proceso más amplio en el que convergen el interés por los biocombustibles avanzados, la evaluación ambiental de procesos, la optimización energética y las discusiones internacionales sobre reducción de emisiones. En este sentido, los datos muestran una mayor presencia del tema en la literatura reciente, en línea con tendencias bibliométricas descritas para campos energéticos y ambientales en expansión (Zhang y col., 2022; Batista-Canino y col., 2023; Ghosh y col., 2022).

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

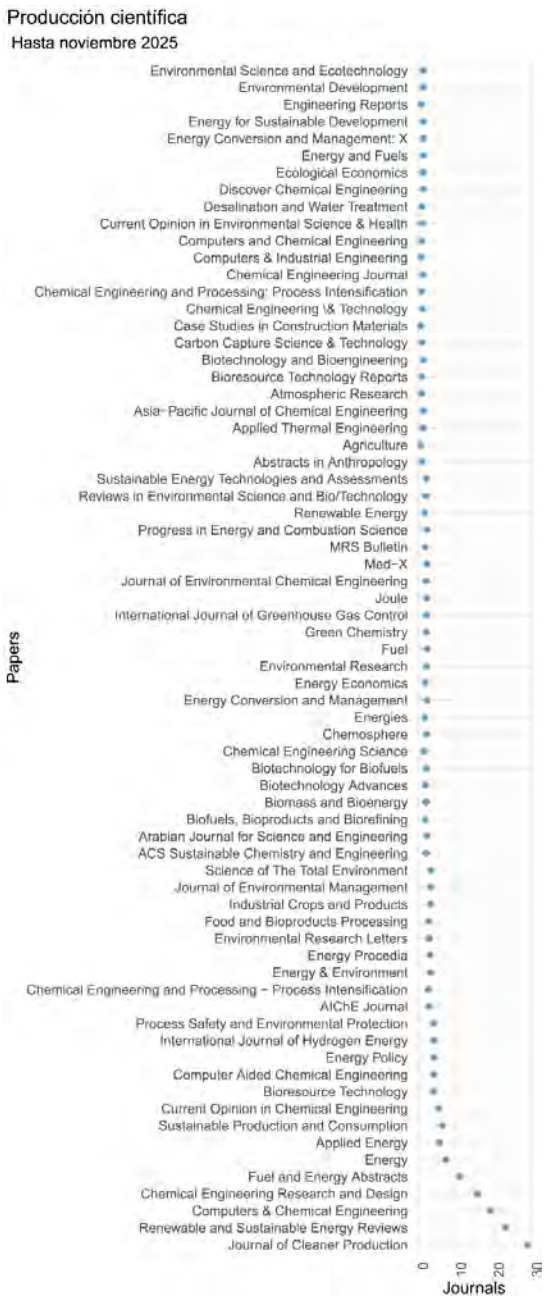


Figura 3. Comparativo de producción científica por revista de artículos sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes, recuperados mediante la ecuación de búsqueda en Scopus, ScienceDirect, Springer, SAGE, Taylor & Francis, ACS, IEEE, IOP, Wiley y MDPI.

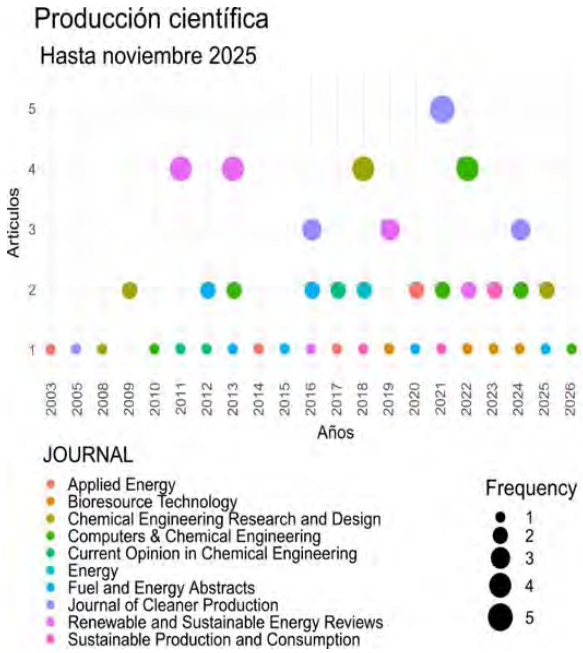


Figura 4. Evolución anual de la producción científica por revista en artículos sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes, recuperados mediante la ecuación de búsqueda en Scopus, ScienceDirect, Springer, SAGE, Taylor & Francis, ACS, IEEE, IOP, Wiley y MDPI, 2003–2026.

En términos generales, las Figuras 2, 3 y 4 muestran que la investigación sobre PSE y biocombustibles verdes ha ganado presencia de forma progresiva, tanto en número de publicaciones como en diversidad de revistas. Este resultado permite establecer una base cuantitativa para los apartados siguientes, donde se analiza con mayor detalle la estructura

editorial, la participación de autores y la organización temática del campo.

3.2. Revistas y fuentes más productivas

El análisis de las fuentes de publicación permite identificar las revistas que han tenido mayor participación en la difusión de estudios sobre PSE aplicado a biocombustibles verdes. Como se muestra en la Figura 5, entre las revistas con mayor número de artículos destacan Journal of Cleaner Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Computers and Chemical Engineering, Fuel and Energy Abstracts, Applied Energy y Bioresource Technology. La presencia de estas revistas muestra que la producción científica del área se distribuye principalmente en espacios vinculados con energía, sostenibilidad, ingeniería de procesos, biotecnología y tecnologías de conversión.

La Figura 6 presenta la productividad de las revistas según la editorial. Se observa que editoriales como Elsevier, Springer, Wiley y Taylor & Francis concentran una parte importante de los documentos analizados. Este resultado debe interpretarse como una concentración editorial de la producción científica, más que como una medida directa de calidad o impacto. En términos bibliométricos, esta distribución permite ubicar las plataformas donde el tema ha tenido mayor presencia y donde se agrupan revistas relacionadas con ingeniería química, energía, medio ambiente y procesos sostenibles.

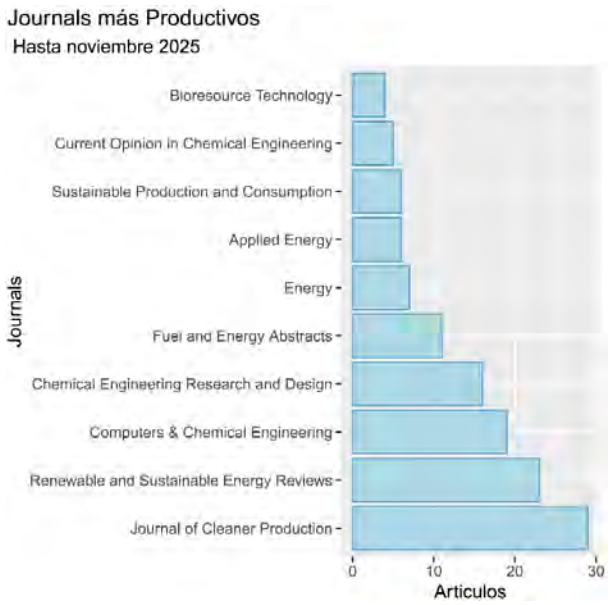


Figura 5. Revistas con mayor producción de artículos sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes, identificadas a partir de la ecuación de búsqueda.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

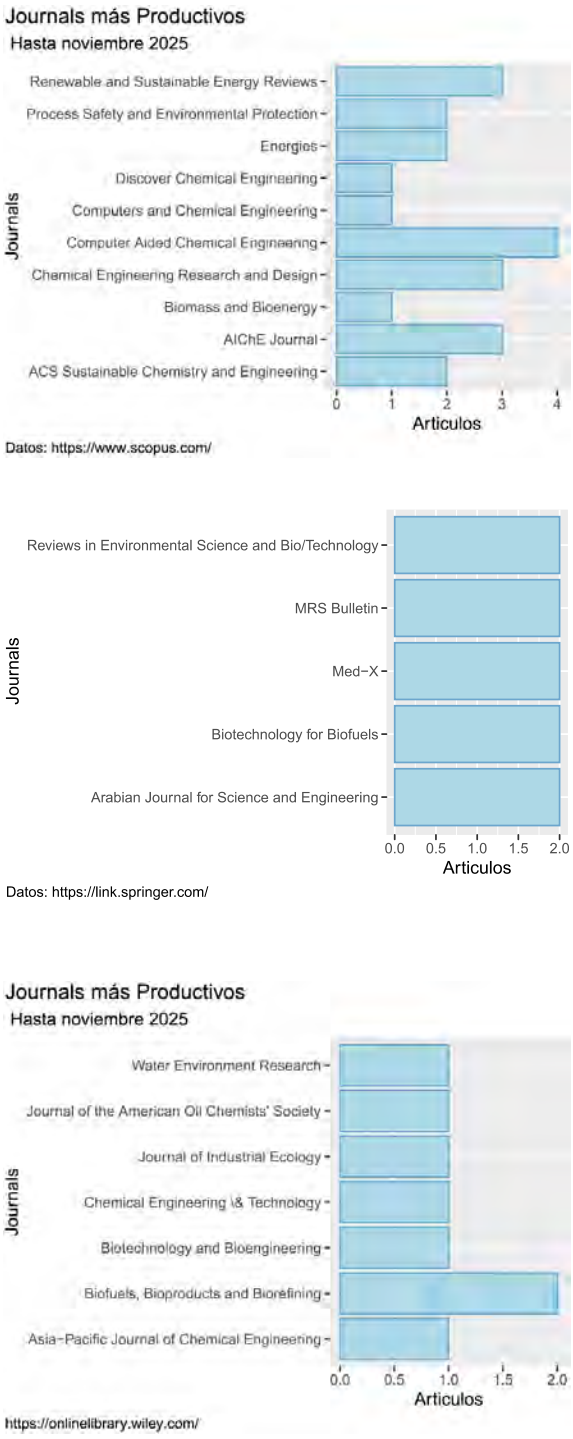


Figura 6. Producción científica por revista de artículos sobre PSE aplicado a biocombustibles verdes, agrupada por fuente editorial: Scopus, SpringerLink y Wiley Online Library.

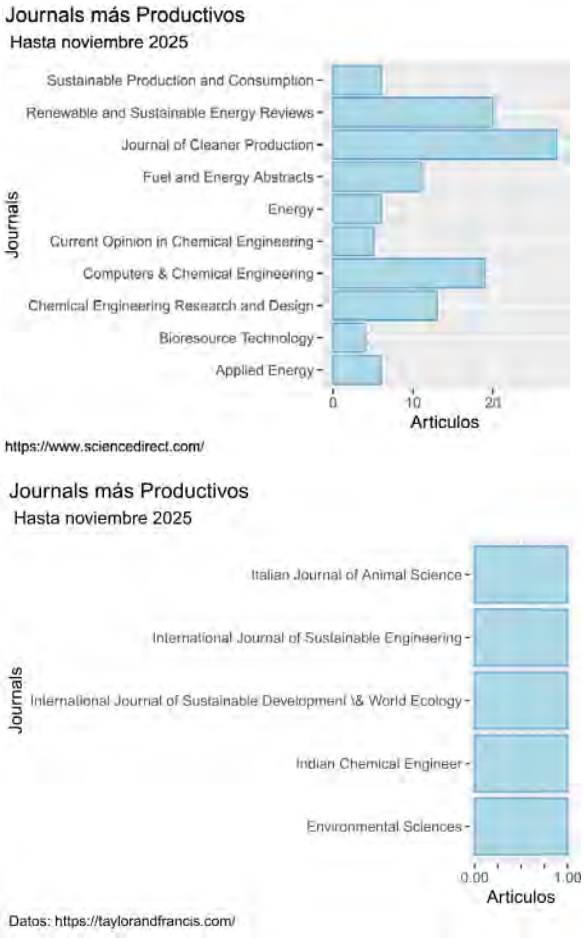


Figura 7. Revistas con mayor número de artículos sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes, identificadas en ScienceDirect y Taylor & Francis mediante la ecuación de búsqueda.

La Figura 7 complementa el análisis al mostrar las revistas con mayor número de artículos dentro de plataformas editoriales específicas. En este caso, se observa que títulos como Sustainable Production and Consumption, Energy Conversion and Management, Chemical Engineering

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

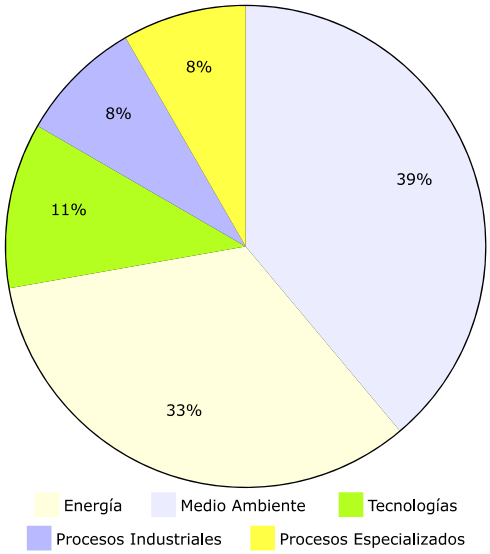
Research and Design y Applied Energy aparecen de manera recurrente.

Esta recurrencia indica que la productividad no depende únicamente del tamaño de la editorial, sino también de la presencia de revistas especializadas en temas cercanos al PSE, como diseño de procesos, eficiencia energética, evaluación ambiental y tecnologías de conversión.

Por su parte, la Figura 8 resume la distribución temática de las revistas más productivas. Los resultados muestran una mayor concentración en las áreas de energía, con 39 %, y medio ambiente, con 33 %, seguidas por tecnologías de procesos, con 11 %, procesos industriales, con 8 %, y procesos especializados, también con 8 %. Esta distribución permite reconocer que la investigación sobre PSE y biocombustibles verdes se publica principalmente en revistas asociadas con energía y sostenibilidad ambiental, aunque también mantiene una presencia relevante en áreas de ingeniería de procesos e industria.

De manera global, las Figuras 5 a 8 muestran que la producción científica sobre PSE y biocombustibles verdes se concentra en un grupo de revistas y editoriales con afinidad temática hacia energía, medio ambiente e ingeniería de procesos. Este resultado permite ubicar los principales canales de publicación del campo y sirve como base para analizar, en los siguientes apartados, la participación de autores, las redes de colaboración y la organización temática de la literatura.

Figura 8. Distribución temática de los 389 artículos analizados sobre Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) aplicada a biocombustibles verdes, clasificados por área principal.



3.3. Autores, colaboración científica y redes temáticas

El análisis de productividad individual permite identificar a los autores con mayor participación en la literatura sobre PSE aplicado a biocombustibles verdes. Como se observa en la Figura 9, entre los investigadores más productivos destacan Rafiqul Gani, Gonzalo Guillén-Gosálbez,

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Raymond R. Tan, Jeng Shun Lim y Haslenda Hashim. Su presencia refleja la importancia de líneas de trabajo vinculadas con modelado, simulación, optimización, síntesis de procesos y evaluación de sostenibilidad en sistemas bioenergéticos.

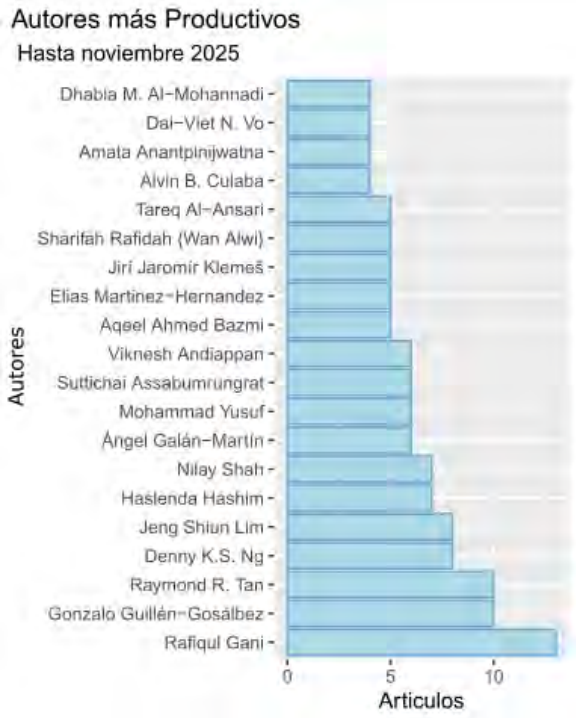


Figura 9. Principales autores según número de publicaciones en PSE y biocombustibles verdes (2003–2025).

No obstante, estos resultados deben interpretarse como una medida de productividad dentro de la base analizada, y no necesariamente como una evaluación directa del impacto científico individual.

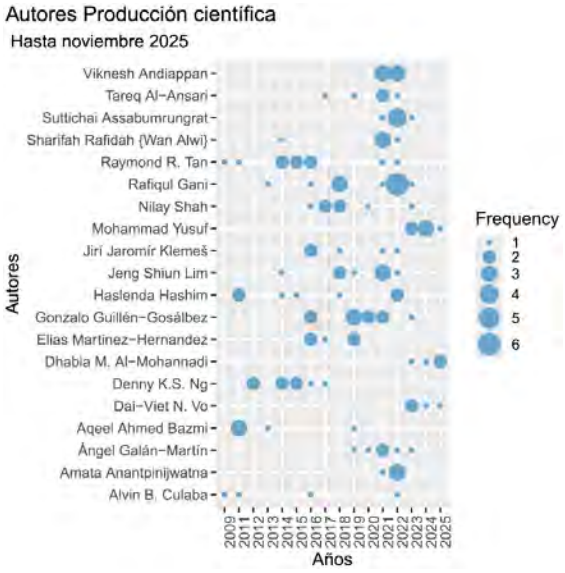


Figura 10. Evolución temporal de la productividad de los autores más destacados en PSE y biocombustibles verdes.

Se observan trayectorias diferenciadas: algunos autores mantienen contribuciones distribuidas a lo largo del periodo de estudio, mientras que otros presentan mayor actividad en etapas específicas. Esta variación puede estar relacionada con el desarrollo de temas particulares dentro del campo, como procesos termoquímicos, integración energética, optimización de biorefinerías y evaluación ambiental. Este comportamiento coincide con patrones bibliométricos reportados en áreas vinculadas con energía y sostenibilidad, donde el crecimiento de nuevas líneas de investigación suele modificar la participación de autores y grupos de trabajo a lo largo del

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

tiempo (Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022; Bazargan y col., 2022).



Figura 11. Red de colaboración científica en el campo del PSE aplicado a biocombustibles verdes: identificación de nodos centrales.

El análisis de colaboración científica complementa la revisión de productividad, ya que permite observar cómo se organizan las relaciones entre autores y grupos de investigación. Debido a la amplitud de la red de coautoría, las Figuras 11 a 14 presentan distintos niveles de aproximación para identificar nodos centrales, conexiones entre investigadores y comunidades de colaboración. Entre los autores con mayor presencia en la red se encuentran Rafiqul Gani, Gonzalo Guillén-Gosálbez y Muhammad Yusuf, quienes aparecen vinculados con trabajos relacionados con intensificación de procesos, optimización, tecnologías de conversión y análisis de sostenibilidad.



Figura 12. Red de coautoría entre investigadores del área: nodos clave y grado de conectividad.



Figura 13. Comunidades temáticas dentro de la red de colaboración científica en PSE y biocombustibles verdes.

Las redes muestran la presencia de grupos de colaboración asociados con temas como diseño de biorefinerías, rutas de biocombustibles avanzados, procesos termoquímicos, análisis de ciclo de vida y

evaluación de emisiones. Esta organización sugiere que el desarrollo del campo no depende únicamente de autores individuales, sino también de comunidades científicas que trabajan sobre problemas complementarios. En este sentido, los resultados son consistentes con estudios bibliométricos que han señalado la importancia de la colaboración internacional y la formación de redes académicas en áreas de ingeniería, energía y sostenibilidad (Nabgan y col., 2023; Funko y col., 2023).

Asimismo, la presencia de vínculos entre autores e instituciones de distintas regiones, incluyendo Asia, Europa y América, muestra el carácter internacional de la investigación en PSE y biocombustibles verdes. Esta colaboración favorece el intercambio de enfoques metodológicos, recursos tecnológicos y experiencias asociadas con diferentes tipos de biomasa y contextos energéticos. Tendencias similares han sido reportadas en estudios cientométricos sobre tecnologías sostenibles, donde la internacionalización aparece como un elemento relevante para el desarrollo de campos emergentes relacionados con energía y medio ambiente (Mühl & de Oliveira, 2022; Ghosh y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

Desde una perspectiva general, las Figuras 9 a 13 permiten reconocer dos elementos centrales: por un lado, la presencia de autores con participación constante en el tema; por otro, la existencia de redes de colaboración que agrupan distintas líneas de trabajo dentro del PSE aplicado a biocombustibles verdes. Estos resultados sirven como base para analizar, en el siguiente apartado, la organización conceptual del campo a partir de palabras clave y relaciones temáticas.

3.4. Análisis de palabras clave y coocurrencias temáticas

El análisis de palabras clave permite identificar los conceptos que aparecen con mayor frecuencia en la literatura sobre PSE aplicado a biocombustibles verdes, así como las relaciones temáticas entre ellos. En el mapa de coocurrencias se observan términos como *sustainability*, *biomass*, *renewable*, *biofuels*, *emissions*, *optimization*, *simulation* y *LCA*, los cuales muestran la cercanía entre procesos de conversión de biomasa, herramientas de optimización y criterios de evaluación ambiental. Esta relación sugiere que el desarrollo del campo se ha orientado hacia el análisis integral de rutas bioenergéticas, combinando desempeño técnico y sostenibilidad.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

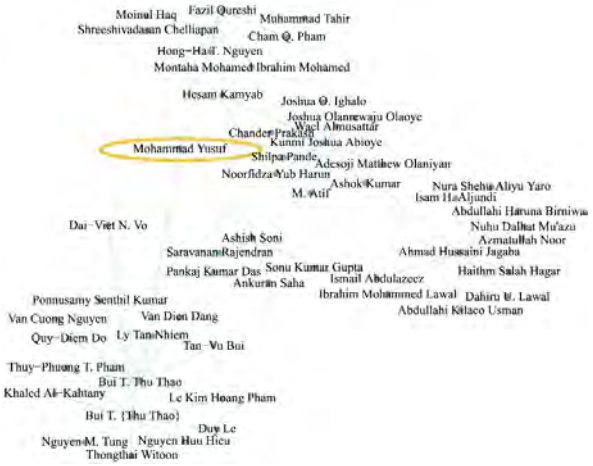


Figura 14. Detalle de la red de colaboración científica en el campo del PSE aplicado a biocombustibles verdes: identificación de nodos centrales.

La nube de palabras presentada en la Figura 15 confirma la recurrencia de estos conceptos dentro del conjunto documental analizado. Los términos *sustainable*, *biomass*, *renewable* y *optimization* aparecen con mayor peso visual, lo que indica su presencia constante en los títulos, resúmenes o palabras clave de los documentos revisados. Esta representación no sustituye el análisis de relaciones entre conceptos, pero permite reconocer de forma rápida los temas más visibles dentro de la producción científica. Resultados similares han sido reportados en estudios bibliométricos sobre energías renovables y tecnologías sostenibles, donde los conceptos asociados con sostenibilidad, digitalización de procesos y evaluación ambiental tienden a aparecer de forma recurrente en la literatura reciente (Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022).



Figura 15. Nube de palabras derivada del análisis de texto de los 389 artículos incluidos en la revisión bibliométrica.

El análisis de conexiones temáticas permite distinguir agrupamientos relacionados con procesos termoquímicos, como gasificación y pirólisis; procesos bioquímicos y fermentativos; y enfoques de modelado, simulación, optimización e integración energética. También se identifican relaciones entre términos como *carbon footprint*, *GHG emissions*, *energy efficiency* y *LCA*, lo que muestra la importancia creciente de las métricas ambientales en la evaluación de tecnologías para biocombustibles. Este comportamiento coincide con estudios recientes que destacan la integración entre

intensificación de procesos, evaluación multicriterio y análisis ambiental dentro de los sistemas energéticos sostenibles (Bazargan y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

De manera articulada, los resultados de palabras clave y coocurrencias muestran que la literatura sobre PSE y biocombustibles verdes se organiza alrededor de tres elementos principales: conversión de biomasa, herramientas de análisis y optimización, y criterios de sostenibilidad ambiental. Esta lectura sirve como base para el análisis jerárquico del siguiente apartado, donde se agrupan con mayor detalle las áreas temáticas identificadas.

3.5. Estructura jerárquica de áreas dentro del PSE aplicado a biocombustibles verdes

El análisis jerárquico de palabras clave permite ordenar los principales conceptos identificados en la literatura y reconocer cómo se agrupan dentro del campo del PSE aplicado a biocombustibles verdes. Como se muestra en la Figura 16, las palabras con mayor frecuencia se relacionan con procesos de conversión, sostenibilidad, optimización, emisiones y energía renovable. Esta primera lectura muestra que el área combina temas propios de la ingeniería de procesos con criterios ambientales y energéticos.

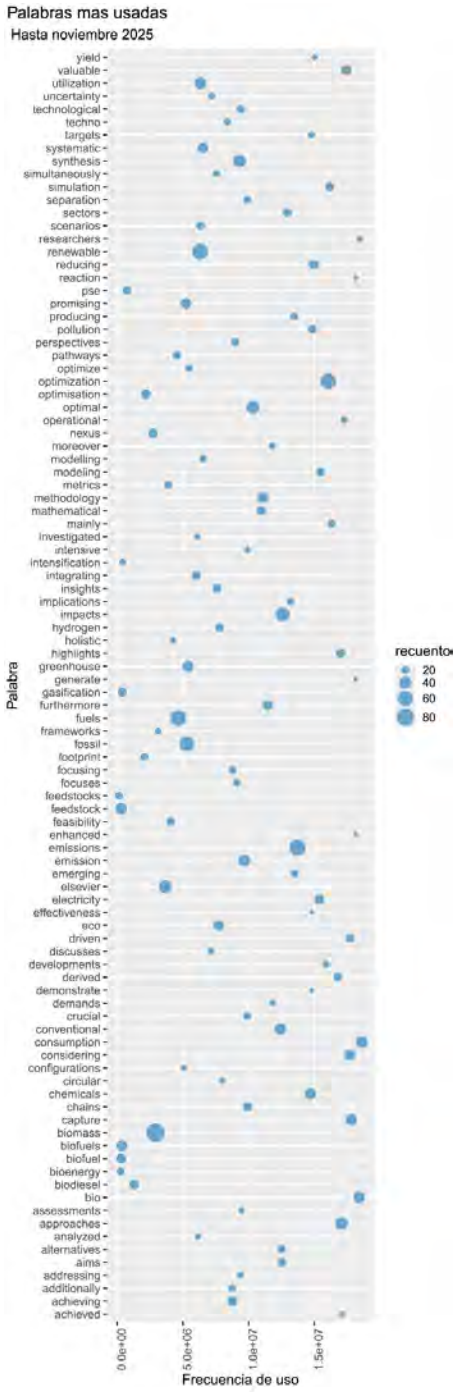


Figura 16. Frecuencia y distribución de las palabras clave más utilizadas en la literatura sobre PSE y biocombustibles verdes.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato



Figura 17. Dendrograma jerárquico de clasificación temática en procesos industriales, energía y sostenibilidad.

La Figura 17 presenta la clasificación jerárquica de estos términos mediante un dendrograma. Esta representación permite identificar grupos conceptuales asociados con procesos industriales y de transformación, tecnologías y métodos de ingeniería, energía y combustibles, medio ambiente y sostenibilidad, y procesos especializados. Dentro de estos grupos aparecen tecnologías como gasificación, pirólisis, fermentación, craqueo, separación y transesterificación, además de operaciones térmicas relacionadas con combustión, calentamiento y enfriamiento. Esta organización permite observar cómo los procesos de conversión y las herramientas de ingeniería se conectan con los objetivos de eficiencia energética y reducción de impactos ambientales.



Figura 18. Primer nivel jerárquico del análisis profundo: agrupación de macro-áreas temáticas en PSE y biocombustibles verdes.

La Figura 18 sintetiza estos resultados en cinco bloques temáticos principales: conceptos de sostenibilidad, procesos industriales, tecnologías de ingeniería, energía y combustibles, y medio ambiente y mitigación. Esta agrupación facilita la lectura general del campo, ya que permite pasar de una lista amplia de términos a una estructura más ordenada de áreas de investigación. La clasificación es consistente con estudios

bibliométricos recientes sobre energías renovables y sistemas híbridos, donde la interacción entre procesos, tecnologías y sostenibilidad aparece como uno de los ejes centrales del análisis (Azad & Parvin, 2022; Zhang y col., 2022; Mühl & de Oliveira, 2022).



Figura 19. Organización de los conceptos fundamentales de sostenibilidad y sus enfoques sistémicos asociados.

La Figura 19 profundiza en el bloque de sostenibilidad. En este grupo aparecen términos como sostenible, circular, ecológico y más limpio, junto con enfoques de carácter sistémico como holístico, integrado y nexo. Estos conceptos muestran que la sostenibilidad no aparece solo como un objetivo general, sino como un criterio que se vincula con métricas ambientales, huella de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, análisis de ciclo de vida y estrategias de mitigación (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022).



Figura 20. Estructura jerárquica de procesos, tecnologías y criterios de sostenibilidad en el PSE aplicado a biocombustibles verdes.

En este estudio, la "estructura jerárquica completa" se refiere a la organización de los términos identificados en el análisis de palabras clave en distintos niveles temáticos. En el primer nivel se agrupan las macroáreas del campo, como procesos industriales, tecnologías y métodos de ingeniería, energía y combustibles, y medio ambiente y sostenibilidad. En niveles más específicos se ubican procesos y conceptos particulares,

como gasificación, pirólisis, fermentación, separación, modelado, simulación, optimización, emisiones, análisis de ciclo de vida y estrategias de mitigación.

Esta lectura permite identificar cuatro ejes de organización: conversión de biomasa, eficiencia energética, evaluación ambiental y estrategias de mitigación.

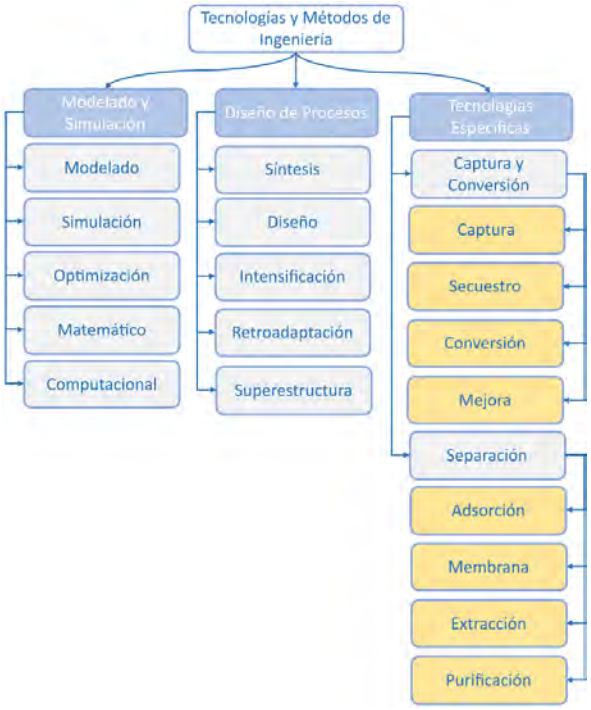


Figura 21. Estructura jerárquica del bloque de Tecnologías y Métodos de Ingeniería en PSE aplicado a biocombustibles verdes: modelado, simulación, optimización, síntesis, intensificación, superestructuras y tecnologías de captura, conversión, separación y purificación.

Para facilitar la interpretación de la clasificación jerárquica, en las Figuras 21 y 22 se utilizó el subrayado en amarillo para distinguir un nivel jerárquico adicional dentro de algunos bloques temáticos. Este recurso se aplicó en los casos en que varios términos aparecen en una misma fila, con el fin de evitar que se interpreten como pertenecientes al mismo nivel de clasificación.

La Figura 21 muestra con mayor detalle el bloque de tecnologías y métodos de ingeniería. En este grupo se ubican conceptos como modelado, simulación, optimización, análisis matemático, síntesis, intensificación, retroadaptación y superestructuras. También aparecen tecnologías específicas de captura, conversión, mejora y separación, como adsorción, membranas, extracción y purificación. Esta organización muestra la importancia de las herramientas computacionales y de diseño dentro del análisis de procesos bioenergéticos.

En la parte final del análisis, la Figura 22 se enfoca en el bloque de medio ambiente y mitigación. En este dominio se agrupan términos relacionados con impacto ambiental, métricas de evaluación, gases de efecto invernadero, contaminación, residuos, captura, secuestro, reducción, circularidad, reciclaje y valorización. Estos resultados muestran que la literatura no solo analiza la

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

producción de biocombustibles desde el desempeño técnico, sino también desde su relación con la reducción de emisiones, la gestión de residuos y el uso más eficiente de recursos. Este enfoque coincide con estudios recientes que destacan la centralidad de las métricas ambientales en el análisis de sistemas energéticos sostenibles (Mühl & de Oliveira, 2022; Bazargan y col., 2022).

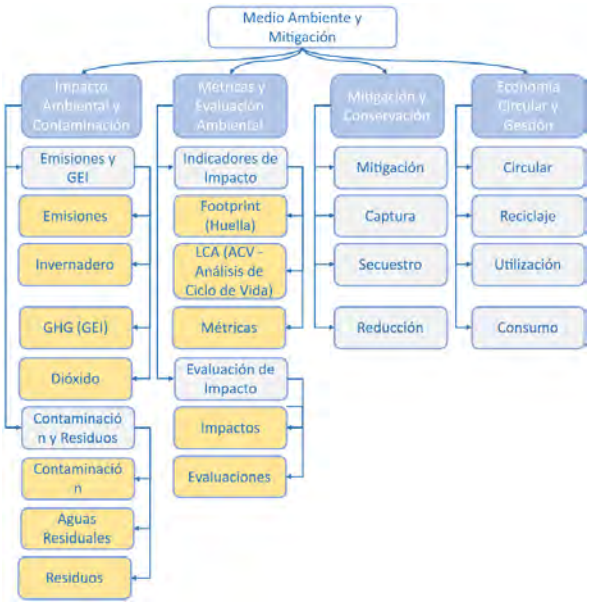


Figura 22. Estructura jerárquica del bloque de Medio Ambiente y Mitigación en PSE aplicado a biocombustibles verdes: impacto ambiental, métricas de evaluación, emisiones, captura, circularidad, reciclaje y gestión de residuos.

Para complementar la interpretación de las Figuras 20, 21 y 22, la Tabla 1 presenta la presencia relativa de los conceptos destacados dentro de la estructura jerárquica. Esta cuantificación permite dimensionar el peso temático de los principales bloques identificados en los 389 documentos analizados, considerando procesos y tecnologías de conversión, eficiencia energética, evaluación ambiental, métodos de ingeniería, separación, captura y mitigación. Los valores se presentan como frecuencias documentales ajustadas, por lo que deben interpretarse como una distribución temática de los conceptos subrayados y no como categorías excluyentes.

Tabla 1. Presencia relativa de los conceptos destacados en la estructura jerárquica de procesos, tecnologías y sostenibilidad.

Bloque temático	Concepto subrayado	Documentos asociados	% respecto a N = 389
Procesos y tecnologías	Conversión de biomasa y biocombustibles (Fig. 20)	68	17.5 %
Energía	Eficiencia e integración energética (Fig. 20)	55	14.1 %
Evaluación ambiental	Análisis de ciclo de vida y huella ambiental (Fig. 20)	52	13.4 %
Mitigación	Emisiones, GEI y mitigación (Figs. 20 y 22)	45	11.6 %
Métodos de ingeniería	Modelado, simulación y análisis matemático (Fig. 21)	43	11.1 %
Métodos de ingeniería	Optimización, síntesis y superestructuras (Fig. 21)	41	10.5 %

Tecnologías de separación	Separación, purificación y membranas (Fig. 21)	33	8.5 %
Captura y conversión	Captura, conversión y *upgrading* (Figs. 21 y 22)	25	6.4 %
Medio ambiente	Circularidad, reciclaje y valorización (Fig. 22)	16	4.1 %
Medio ambiente	Residuos, contaminación y gestión ambiental (Fig. 22)	11	2.8 %

Nota: Los conceptos no son excluyentes dentro del análisis bibliométrico original, ya que un mismo documento puede abordar más de un tema. Por ello, los porcentajes deben interpretarse como una distribución temática ajustada de los conceptos destacados.

En síntesis, el análisis jerárquico permite ordenar las principales áreas temáticas del PSE aplicado a biocombustibles verdes y muestra la relación entre tecnologías de conversión, herramientas de ingeniería, energía renovable y sostenibilidad ambiental. Esta estructura ofrece una base clara para la discusión posterior sobre el papel del PSE en el diseño, evaluación y mejora de sistemas bioenergéticos.

4. Análisis crítico: el papel del PSE en biocombustibles verdes

A partir de los resultados bibliométricos, se observa que la Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) cumple un papel central en el estudio de los biocombustibles verdes, principalmente porque permite conectar el diseño de procesos, la evaluación energética, la optimización y el análisis ambiental dentro de un mismo marco de análisis. Esta integración es relevante en sistemas bioenergéticos, donde las decisiones sobre conversión, separación, uso de energía y desempeño ambiental no pueden evaluarse de manera aislada. Por ello, esta sección discute cómo las metodologías del PSE se aplican al análisis de rutas de biocombustibles y cómo contribuyen a evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Como punto de partida para este análisis, la Tabla 2 resume la distribución temática ajustada de las metodologías, aplicaciones y criterios de evaluación identificados en los 389 documentos revisados. Esta información permite ubicar el peso relativo de los enfoques que se desarrollan en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3, incluyendo modelado, simulación, optimización, integración energética, análisis de ciclo de vida, diseño de biorefinerías y evaluación técnico-económica. Los valores se presentan como una distribución temática normalizada, ya que un mismo documento puede abordar más de una metodología o aplicación dentro del PSE.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Tabla 2. Distribución temática ajustada de las metodologías, aplicaciones y criterios de evaluación del PSE en biocombustibles verdes.

Categoría analizada	Documentos asociados, n ajustado	% respecto a N = 389
Modelado, simulación y balances de proceso (Sec. 4.1)	72	18.5 %
Optimización, síntesis e integración energética (Sec. 4.1)	88	22.6 %
Evaluación ambiental y análisis de ciclo de vida (Sec. 4.1)	61	15.7 %
Rutas de conversión de biomasa (Sec. 4.2)	54	13.9 %
Diseño y optimización de biorefinerías (Sec. 4.2)	39	10.0 %
Integración energética y recuperación de calor (Sec. 4.2)	31	8.0 %
Cadenas de suministro y disponibilidad de biomasa (Sec. 4.2)	18	4.6 %
Evaluación técnica (Sec. 4.3)	11	2.8 %
Evaluación económica (Sec. 4.3)	7	1.8 %
Evaluación ambiental (Sec. 4.3)	5	1.3 %
Optimización multiobjetivo y análisis de compromisos (Sec. 4.3)	3	0.8 %

4.1 Metodologías clave identificadas en la literatura

El análisis de los 389 documentos revisados muestra que las metodologías más empleadas en el estudio de biocombustibles verdes se apoyan en herramientas propias de la Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE). Estas metodologías permiten representar, comparar y mejorar rutas de conversión de biomasa desde una perspectiva técnica, energética y ambiental. En lugar de analizar etapas aisladas, el PSE facilita una lectura integrada del proceso, lo cual resulta clave para evaluar tecnologías que combinan conversión, separación, recuperación de energía y control de impactos ambientales.

Los balances de materia y energía constituyen una base común en los estudios revisados, ya que permiten estimar flujos, conversiones, rendimientos y requerimientos energéticos en procesos termoquímicos y bioquímicos, como gasificación, pirólisis, fermentación o transesterificación. Cuando estos balances se complementan con análisis exergético, es posible identificar pérdidas, irreversibilidades y oportunidades de mejora en sistemas integrados. Esta combinación ha ganado relevancia en estudios recientes sobre eficiencia energética y sostenibilidad de

procesos, particularmente en rutas asociadas a bioenergía y conversión de biomasa (Bazargan y col., 2022).

Otra metodología recurrente es la integración de calor, utilizada para reducir el consumo energético en procesos intensivos. Herramientas como el análisis Pinch, las curvas compuestas y el diseño de redes de intercambiadores de calor permiten identificar oportunidades de recuperación térmica y mejorar el uso de servicios energéticos. Su aplicación es especialmente importante en biorefinerías, donde las etapas de conversión y separación suelen presentar demandas térmicas elevadas. En este sentido, la integración energética aparece como una estrategia clave para mejorar la eficiencia del proceso sin modificar necesariamente la ruta tecnológica principal (Zhang y col., 2022).

La programación matemática también ocupa un lugar importante dentro de la literatura analizada. Los modelos MILP, MINLP y los enfoques estocásticos se emplean para seleccionar tecnologías, dimensionar equipos, comparar configuraciones de proceso y evaluar escenarios con incertidumbre en materias primas, costos o disponibilidad energética. Estas herramientas son útiles porque permiten estudiar varias alternativas de diseño antes de avanzar hacia etapas experimentales o industriales. Además, su uso coincide con la necesidad de formular biorefinerías más flexibles, capaces de adaptarse a distintas condiciones de operación y suministro (Azad & Parvin, 2022; Mühl & de Oliveira, 2022).

La evaluación ambiental mediante LCA representa otra metodología central en el campo. Su incorporación permite cuantificar impactos como emisiones de CO_2-equivalente, uso de agua, consumo de recursos y generación de residuos. En los estudios sobre biocombustibles verdes, el LCA ayuda a evitar que una ruta sea evaluada únicamente por su rendimiento técnico o económico, incorporando también sus efectos ambientales a lo largo de la cadena de valor. Esta perspectiva resulta especialmente relevante en tecnologías que buscan reducir emisiones, pero que pueden generar impactos indirectos durante la producción, transporte o procesamiento de la biomasa (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022).

De forma complementaria, estas metodologías muestran que el PSE aporta una base sólida para analizar biocombustibles verdes de forma integral. Su valor no está solo en optimizar una etapa del proceso, sino en

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

conectar información técnica, energética, económica y ambiental para apoyar decisiones de diseño y operación. Esta integración explica por qué el PSE se ha convertido en una herramienta relevante para evaluar rutas bioenergéticas y orientar el desarrollo de procesos con mayor viabilidad y menor impacto ambiental.

4.2 Aplicaciones del PSE a rutas de biocombustibles

Las aplicaciones del PSE en biocombustibles verdes se orientan principalmente a analizar rutas de conversión de biomasa como sistemas completos, no como etapas aisladas. Esta perspectiva permite estudiar de manera conjunta la transformación de la materia prima, las operaciones de separación, la recuperación de energía y la calidad de los productos obtenidos. En este sentido, el PSE funciona como una base de análisis para comparar alternativas tecnológicas y reconocer puntos críticos dentro de las rutas termoquímicas, bioquímicas y catalíticas asociadas a la producción de biocombustibles (Bazargan y col., 2022; Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022).

Una de sus aplicaciones más importantes se encuentra en el modelado de rutas de conversión. A través de modelos de proceso es posible representar el comportamiento de sistemas como gasificación, pirólisis, fermentación, transesterificación y esquemas híbridos de conversión. Estos modelos permiten estimar rendimientos, consumo de energía, generación de subproductos y requerimientos de separación, lo que facilita la comparación entre configuraciones antes de avanzar hacia etapas de mayor escala. Más que sustituir la experimentación, el PSE ayuda a ordenar la información disponible y a reducir el número de alternativas que deben evaluarse experimentalmente.

Otra aplicación relevante es el diseño y optimización de biorefinerías. En este ámbito, el PSE permite integrar distintas rutas de conversión, corrientes de biomasa, productos intermedios, sistemas de separación y opciones de recuperación energética dentro de una misma estructura de decisión. Esto resulta útil para seleccionar configuraciones de proceso, dimensionar unidades, asignar flujos y evaluar escenarios con distinta disponibilidad de materia prima. En particular, los enfoques de superestructura y optimización permiten comparar varias combinaciones tecnológicas bajo criterios de eficiencia, costo y desempeño ambiental, como se ha señalado en estudios recientes

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

sobre diseño de sistemas energéticos sostenibles (Mühl y de Oliveira, 2022).

La integración energética también aparece como una aplicación transversal en rutas de biocombustibles. En procesos con alta demanda térmica, el PSE permite identificar oportunidades de recuperación de calor, reducir el consumo de servicios auxiliares y mejorar la eficiencia global del sistema. Esta aplicación es especialmente importante en rutas donde las etapas de conversión y separación concentran una parte significativa del consumo energético. De esta forma, la integración de energía no se limita a mejorar una unidad específica, sino que ayuda a rediseñar la relación entre las distintas etapas del proceso (Bazargan y col., 2022).

Además, el PSE se aplica al análisis de cadenas completas de producción, desde el suministro de biomasa hasta la obtención del combustible final. Este enfoque permite considerar aspectos como disponibilidad regional de materias primas, transporte, pretratamiento, conversión, purificación y distribución. Al incorporar estos niveles de análisis, las rutas de biocombustibles pueden evaluarse con mayor realismo, especialmente cuando existe variabilidad en la composición de la biomasa o incertidumbre en las condiciones de suministro. Esta visión multiescala ha sido destacada en revisiones recientes sobre bioenergía y sistemas sostenibles (Nabgan y col., 2023).

Finalmente, las aplicaciones del PSE se han extendido hacia la integración temprana de criterios ambientales en el diseño de procesos. En lugar de evaluar los impactos al final del desarrollo tecnológico, varios estudios incorporan indicadores ambientales desde las primeras etapas de modelado y selección de rutas. Esto permite identificar compensaciones entre rendimiento, consumo energético, emisiones y uso de recursos, evitando que una alternativa sea considerada favorable únicamente por su desempeño técnico. Esta tendencia coincide con trabajos sobre sostenibilidad industrial y transición energética, donde la evaluación ambiental se integra cada vez más al diseño de procesos (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022).

Al integrar estos resultados, las aplicaciones del PSE muestran un cambio importante en la forma de estudiar los biocombustibles verdes: de la evaluación de operaciones individuales hacia el análisis integrado de rutas, biorefinerías y cadenas de suministro. Esta aproximación permite comparar alternativas con mayor claridad, reconocer cuellos de

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

botella y apoyar decisiones de diseño orientadas a procesos más eficientes y con menor impacto ambiental.

4.3 Evaluación técnica, económica y ambiental con PSE

La evaluación técnica, económica y ambiental es una de las aplicaciones más importantes del PSE en el estudio de biocombustibles verdes. Su valor principal está en que permite comparar rutas de proceso bajo varios criterios al mismo tiempo, evitando que una alternativa sea seleccionada únicamente por su rendimiento técnico o por su menor costo. En sistemas bioenergéticos, esta visión integrada es necesaria porque las mejoras en conversión, eficiencia energética o reducción de emisiones suelen estar relacionadas con cambios en inversión, operación y complejidad del proceso.

Desde el punto de vista técnico, el PSE permite estimar conversiones, rendimientos, requerimientos energéticos, pérdidas térmicas y necesidades de separación. Estos indicadores ayudan a comparar configuraciones de proceso y a detectar etapas críticas antes de avanzar hacia escalas mayores. En particular, los modelos de proceso permiten evaluar cómo cambian los resultados ante variaciones en la composición de la biomasa, condiciones de operación o integración energética. Esta lectura técnica coincide con estudios recientes donde la modelación y la simulación se reconocen como herramientas centrales para analizar sistemas energéticos y rutas de conversión de biomasa (Bazargan y col., 2022; Zhang y col., 2022).

En la dimensión económica, el PSE facilita la estimación de indicadores como CAPEX, OPEX, costos de operación y mantenimiento, costos de materia prima y costo nivelado del combustible (LCOF). Estos indicadores permiten valorar la viabilidad de distintas rutas y reconocer cuáles etapas del proceso tienen mayor peso sobre el costo final. Además, al integrarse con modelos de optimización, es posible comparar configuraciones bajo criterios de costo mínimo, mejor aprovechamiento de recursos o mayor flexibilidad operativa. Este enfoque es consistente con trabajos que emplean modelos matemáticos para seleccionar rutas de conversión y configuraciones de biorrefinería dentro de sistemas complejos de decisión (Mühl y de Oliveira, 2022; Nabgan y col., 2023).

La dimensión ambiental se aborda principalmente mediante el Análisis de Ciclo

de Vida, que permite cuantificar emisiones de CO_2-equivalente, huella de carbono, uso de agua, generación de residuos y otros impactos asociados a la cadena de producción. Su integración con modelos de proceso permite que los impactos ambientales no se evalúen como un resultado aislado al final del análisis, sino como parte de las decisiones de diseño. Esto es relevante porque una ruta con buen rendimiento técnico puede presentar impactos indirectos importantes asociados al suministro de biomasa, consumo de energía, uso de solventes o etapas de separación. Esta perspectiva coincide con estudios sobre sostenibilidad industrial y transición energética que destacan la necesidad de conectar la evaluación ambiental con el diseño de procesos (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022).

Una contribución relevante del PSE es la posibilidad de analizar compensaciones entre criterios técnicos, económicos y ambientales. La optimización multiobjetivo, incluyendo enfoques como NSGA-II y el análisis de fronteras de Pareto, permite identificar soluciones donde no existe una única alternativa óptima, sino distintos equilibrios entre costo, eficiencia y emisiones. Este tipo de análisis es especialmente útil en biocombustibles verdes, donde reducir impactos ambientales puede implicar mayores costos de inversión o requerimientos energéticos adicionales. Por ello, estas herramientas apoyan una toma de decisiones más transparente y permiten visualizar con mayor claridad los compromisos entre desempeño del proceso, viabilidad económica y sostenibilidad (Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022).

En términos generales, la evaluación técnica, económica y ambiental mediante PSE permite pasar de una comparación parcial de tecnologías a una lectura integral de las rutas de biocombustibles verdes. Esta integración ayuda a identificar cuellos de botella, estimar costos, cuantificar impactos y reconocer alternativas con mejor balance entre desempeño, viabilidad e impacto ambiental. Así, el PSE no solo contribuye a mejorar procesos existentes, sino también a orientar decisiones de diseño para el desarrollo de sistemas bioenergéticos más robustos y realistas.

5. Tendencias emergentes: hacia un PSE 4.0

El avance de la ingeniería de procesos y la necesidad de desarrollar sistemas energéticos con menor impacto ambiental han impulsado una nueva etapa en la aplicación del PSE. En

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

este contexto, el PSE 4.0 surge como una forma de integrar las herramientas tradicionales de modelado, simulación y optimización con capacidades digitales como inteligencia artificial, análisis de datos, automatización, sensores avanzados y gemelos digitales. Esta integración no reemplaza los fundamentos clásicos del PSE, sino que los amplía para atender procesos más complejos, dinámicos y con mayor incertidumbre.

En el campo de los biocombustibles verdes, esta transición es especialmente relevante debido a la variabilidad de la biomasa, la complejidad de las rutas de conversión y la necesidad de mejorar el desempeño técnico, económico y ambiental de las biorefinerías. La literatura reciente muestra que la digitalización y la analítica avanzada están ganando presencia en el diseño y operación de sistemas bioenergéticos, al permitir una mejor predicción del comportamiento del proceso, una toma de decisiones más rápida y una operación más flexible frente a cambios en materia prima, energía o demanda de producto (Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022; Mühl y de Oliveira, 2022).

Dentro de este panorama, destacan tres líneas de avance: el uso de modelos híbridos que combinan conocimiento físico con datos de proceso; la aplicación de inteligencia artificial para predicción, optimización y control; y el desarrollo de gemelos digitales para monitorear y ajustar la operación en tiempo real. Estas tendencias ya han sido señaladas en estudios recientes sobre ingeniería de materiales, energías renovables y optimización de procesos, donde el aprendizaje automático y los enfoques digitales han mostrado potencial para mejorar el análisis de sistemas complejos (Yang y col., 2020; Bazargan y col., 2022; Nabgan y col., 2023).

Así, esta sección analiza las principales tendencias asociadas al PSE 4.0 en biocombustibles verdes, con énfasis en la inteligencia artificial, los modelos híbridos, los gemelos digitales, el control avanzado y las biorefinerías inteligentes. La intención no es presentar estas herramientas como una solución automática, sino discutir cómo pueden fortalecer el diseño, evaluación y operación de sistemas bioenergéticos cuando se integran de manera coherente con criterios de sostenibilidad y desempeño de proceso (Ghosh y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

5.1. Modelado híbrido, gemelos digitales y control avanzado

Una de las líneas más relevantes dentro del PSE 4.0 es la integración entre modelos fenomenológicos y modelos basados en datos. Los modelos fenomenológicos siguen siendo fundamentales porque conservan balances, restricciones físicas y relaciones termodinámicas del proceso. Sin embargo, en sistemas bioenergéticos existen fenómenos difíciles de representar con ecuaciones convencionales, como la variabilidad de la biomasa, los cambios en la actividad catalítica, las dinámicas de fermentación o las respuestas no lineales ante distintas condiciones de operación. En este contexto, los modelos híbridos permiten combinar el conocimiento físico del proceso con información obtenida de datos experimentales u operativos, mejorando la capacidad de predicción sin perder interpretabilidad técnica (Yang y col., 2020; Mühl y de Oliveira, 2022).

Esta tendencia resulta especialmente útil en rutas de biocombustibles donde la composición de la materia prima, la temperatura, el tiempo de residencia, la humedad o la presencia de inhibidores pueden modificar de forma importante el rendimiento del proceso. Al integrar modelos de proceso con datos, el PSE puede apoyar una evaluación más realista de rutas termoquímicas, bioquímicas y catalíticas, así como facilitar la comparación de escenarios antes de escalar una tecnología. No se trata de reemplazar el modelado tradicional, sino de fortalecerlo con información que ayude a representar mejor la complejidad del sistema.

Otra tendencia importante es el desarrollo de gemelos digitales, entendidos como representaciones virtuales del proceso que se actualizan con información de sensores, simulaciones y datos de operación. En el caso de las biorefinerías, estos sistemas permiten monitorear variables críticas, anticipar desviaciones, ajustar condiciones de operación y evaluar el desempeño del proceso en tiempo real. Su aporte principal está en conectar el diseño con la operación, de modo que las decisiones no dependan solo de modelos estáticos, sino también del comportamiento observado durante el funcionamiento del sistema.

El control avanzado complementa esta evolución al permitir respuestas más rápidas frente a cambios en la calidad de la biomasa, disponibilidad energética o demanda de producto. Estrategias como el control

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

predictivo basado en modelos, el control robusto y los esquemas adaptativos pueden mejorar la estabilidad operativa de procesos con alta incertidumbre. Esto es relevante porque muchas rutas de biocombustibles verdes no operan bajo condiciones completamente constantes; por el contrario, dependen de materias primas variables y de procesos donde pequeñas desviaciones pueden afectar rendimiento, consumo energético o calidad del producto.

De manera global, el modelado híbrido, los gemelos digitales y el control avanzado muestran cómo el PSE 4.0 puede fortalecer el diseño y la operación de sistemas bioenergéticos. Estas herramientas permiten pasar de modelos únicamente descriptivos a esquemas más dinámicos, capaces de aprender de los datos, anticipar problemas y apoyar decisiones operativas. Su desarrollo debe entenderse como un complemento de las metodologías clásicas del PSE y como una base para la discusión posterior sobre inteligencia artificial y biorefinerías inteligentes (Ghosh y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

5.2 Inteligencia artificial en biocombustibles

La inteligencia artificial (IA) ha comenzado a ocupar un lugar importante en el estudio de biocombustibles verdes, especialmente por su capacidad para analizar datos complejos, reconocer patrones y apoyar la toma de decisiones en sistemas con alta variabilidad. En el contexto del PSE, su principal aporte no consiste en reemplazar los modelos tradicionales, sino en complementarlos cuando existen fenómenos difíciles de describir con ecuaciones convencionales, como cambios en la composición de la biomasa, efectos catalíticos, inhibición en procesos fermentativos o respuestas no lineales ante distintas condiciones de operación. Esta tendencia coincide con estudios recientes que identifican al aprendizaje automático, la analítica de datos y la modelación híbrida como herramientas emergentes en energía sostenible y sistemas de procesos (Yang y col., 2020; Zhang y col., 2022).

Una de las aplicaciones más frecuentes de la IA es la predicción de variables clave del proceso. Algoritmos como redes neuronales, bosques aleatorios y máquinas de soporte vectorial se han utilizado para estimar poder calorífico, conversión, rendimiento, distribución de productos y eficiencia energética en rutas termoquímicas y bioquímicas. Estas herramientas resultan útiles cuando se trabaja con materias primas

heterogéneas, como residuos agrícolas o biomasa lignocelulósica, ya que permiten relacionar composición, condiciones de operación y desempeño del proceso con mayor rapidez que los enfoques puramente experimentales.

La IA también se ha incorporado al diseño y optimización de procesos. Al combinar modelos predictivos con algoritmos de optimización, es posible explorar un mayor número de configuraciones y reconocer alternativas que no siempre son evidentes mediante análisis convencionales. Este enfoque permite comparar escenarios, identificar condiciones de operación favorables y analizar compromisos entre rendimiento, consumo energético, costo e impacto ambiental. En este sentido, la IA fortalece la capacidad del PSE para estudiar sistemas complejos, especialmente en procesos intensificados o biorefinerías flexibles, donde existen muchas variables de decisión y relaciones no lineales (Bazargan y col., 2022; Nabgan y col., 2023).

Otra aplicación relevante se encuentra en la evaluación ambiental. Los modelos basados en datos pueden apoyar la estimación de inventarios de ciclo de vida, la predicción de emisiones indirectas y la identificación de puntos críticos ambientales. Esta integración entre IA y Análisis de Ciclo de Vida permite realizar evaluaciones más ágiles y explorar escenarios relacionados con disponibilidad de biomasa, cambios operativos, integración energética y políticas de mitigación. De esta manera, la IA no solo contribuye al desempeño técnico del proceso, sino también a una evaluación ambiental más temprana y flexible (Ghosh y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

A pesar de su potencial, el uso de IA en biocombustibles verdes también presenta limitaciones. Su desempeño depende de la calidad, cantidad y representatividad de los datos disponibles. Además, algunos modelos pueden ofrecer buena capacidad predictiva, pero poca claridad sobre las razones físicas detrás de sus resultados. Por ello, su aplicación dentro del PSE debe mantenerse vinculada con conocimiento del proceso, validación experimental y criterios de ingeniería. Esta precaución es importante para evitar que la IA se use como una herramienta aislada, sin conexión con balances, restricciones físicas o indicadores de sostenibilidad.

De forma integrada, la inteligencia artificial amplía las capacidades del PSE al mejorar la

predicción, acelerar la exploración de alternativas y apoyar evaluaciones técnicas y ambientales más flexibles. Su mayor valor aparece cuando se integra con modelos de proceso, optimización y métricas de sostenibilidad, ya que permite analizar rutas de biocombustibles con mayor detalle y bajo escenarios más realistas. Así, la IA se perfila como una herramienta de apoyo para avanzar hacia sistemas bioenergéticos más adaptables, eficientes y mejor evaluados desde etapas tempranas de diseño (Mühl y de Oliveira, 2022).

5.3 Biorefinerías inteligentes intensificadas

Las biorefinerías inteligentes intensificadas representan una de las aplicaciones más completas del PSE 4.0 en el campo de los biocombustibles verdes. Su desarrollo responde a la necesidad de diseñar sistemas capaces de aprovechar mejor la biomasa, reducir consumos energéticos, disminuir impactos ambientales y adaptarse a condiciones variables de operación. A diferencia de una biorrefinería convencional, este enfoque no solo busca integrar distintas rutas de conversión, sino también combinar intensificación de procesos, monitoreo avanzado, análisis de datos y criterios de sostenibilidad desde las etapas tempranas de diseño (Zhang y col., 2022; Bazargan y col., 2022; Nabgan y col., 2023).

La intensificación de procesos constituye un componente central de esta transformación. Tecnologías como destilación reactiva, membranas híbridas, pervaporación, extracción integrada, reactores multifuncionales y esquemas de conversión–separación acoplados permiten reducir etapas, mejorar la eficiencia energética y aumentar la productividad del sistema. Estas alternativas son especialmente relevantes en rutas de biocombustibles donde las operaciones de separación y purificación suelen representar una parte importante del consumo energético. Sin embargo, su adopción requiere una evaluación cuidadosa, ya que una configuración más intensificada puede reducir energía o equipos, pero también aumentar la complejidad operativa y los requerimientos de control.

La incorporación de herramientas digitales permite que estas configuraciones intensificadas operen con mayor flexibilidad. Sensores, plataformas de monitoreo, modelos de proceso y sistemas de control pueden ayudar a ajustar condiciones de operación frente a cambios en la composición de la biomasa, disponibilidad de energía o

especificaciones del producto. En este sentido, la digitalización no debe entenderse únicamente como automatización, sino como una forma de conectar información de proceso con decisiones operativas más rápidas y mejor sustentadas. Esta tendencia coincide con el avance del PSE 4.0 y con los enfoques recientes de operación inteligente en sistemas energéticos y de procesos (Mühl y de Oliveira, 2022; Yang y col., 2020).

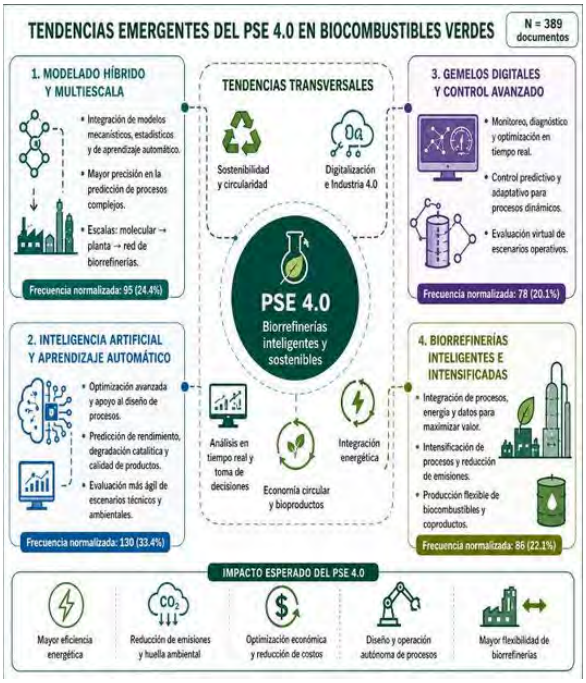


Figura 23. Tendencias emergentes del PSE 4.0 en biocombustibles verdes: modelado híbrido, inteligencia artificial, gemelos digitales y biorefinerías inteligentes intensificadas.

Otro elemento importante es la integración de criterios ambientales dentro del diseño de biorefinerías. El acoplamiento entre simulación de procesos, análisis energético y evaluación de ciclo de vida permite estimar impactos asociados con emisiones, uso de agua, generación de residuos y consumo de recursos. Esto evita que la intensificación se evalúe solo por su eficiencia técnica, y permite analizar si las mejoras en productividad o energía realmente se traducen en beneficios ambientales. Esta visión es especialmente importante en biocombustibles verdes, donde el objetivo no es solo producir combustibles renovables, sino hacerlo con menor impacto a lo largo de la cadena de valor (Secinaro y col., 2020; Ghosh y col., 2022).

Desde la perspectiva del PSE, el valor de las biorefinerías inteligentes intensificadas está en su capacidad para integrar decisiones de diseño, operación y evaluación ambiental en un mismo marco de análisis. Esto permite comparar configuraciones, identificar cuellos de botella, anticipar problemas operativos y seleccionar alternativas con mejor balance entre eficiencia, flexibilidad y sostenibilidad. Aun así, su desarrollo enfrenta retos importantes, como la disponibilidad de datos confiables, la validación de modelos, la interoperabilidad entre plataformas digitales y la necesidad de personal con formación tanto en ingeniería de procesos como en

análisis de datos. La Figura 23 sintetiza estas tendencias emergentes del PSE 4.0 y muestra cómo el modelado híbrido, la inteligencia artificial, los gemelos digitales, el control avanzado y las biorefinerías inteligentes se articulan alrededor de objetivos comunes como eficiencia energética, reducción de emisiones, optimización económica y operación más flexible.

En conjunto, las biorefinerías inteligentes intensificadas muestran cómo el PSE 4.0 puede pasar de ser una tendencia conceptual a una estrategia concreta para mejorar sistemas de producción de biocombustibles. Su mayor aporte no está en incorporar tecnologías digitales de manera aislada, sino en integrarlas con principios de intensificación, control de procesos y evaluación ambiental. De esta forma, ofrecen una ruta prometedora para avanzar hacia procesos bioenergéticos más eficientes, flexibles y ambientalmente mejor evaluados.

6. Desafíos futuros

Los resultados del análisis bibliométrico, junto con la revisión crítica de metodologías, aplicaciones y tendencias emergentes, permiten identificar los principales desafíos que pueden orientar el desarrollo del PSE aplicado a biocombustibles verdes en los próximos años. Estos retos no se limitan a la mejora de tecnologías de conversión, sino que también involucran el suministro de biomasa, la eficiencia energética, el escalado industrial, la integración con nuevas rutas de descarbonización y la adopción gradual de herramientas digitales. Esta visión coincide con tendencias recientes en PSE 4.0 y sistemas energéticos sostenibles (Azad y Parvin, 2022; Zhang y col., 2022; Mühl y de Oliveira, 2022).

En este trabajo, los desafíos se agrupan en cinco ejes: variabilidad y suministro de biomasa, eficiencia energética en operaciones de separación, escalado industrial de tecnologías emergentes, integración con hidrógeno verde y captura de CO_2, y digitalización de biorefinerías.

6.1 Variabilidad y suministro de biomasa

La heterogeneidad de la biomasa sigue siendo uno de los retos más importantes para el diseño y operación de procesos de biocombustibles. Su composición, humedad, disponibilidad y logística pueden cambiar según la región, la temporada y el tipo de residuo utilizado. Estas variaciones afectan las conversiones, los balances de materia y energía, la estabilidad operativa y la calidad de los productos obtenidos.

Desde el enfoque del PSE, este desafío requiere modelos capaces de incorporar incertidumbre, análisis de sensibilidad y optimización estocástica, con el fin de diseñar cadenas de suministro más flexibles y resistentes a cambios en la disponibilidad de materia prima. La literatura sobre sostenibilidad y bioeconomía ha señalado la importancia de considerar estos factores desde etapas tempranas del diseño del proceso (Ghosh y col., 2022; Bazargan y col., 2022). En este contexto, sensores avanzados, inteligencia artificial y control adaptativo pueden apoyar la identificación temprana de variaciones en la biomasa y el ajuste de condiciones de operación, aunque su implementación todavía depende de datos confiables e infraestructura adecuada (Yang y col., 2020; Zhang y col., 2022).

6.2 Eficiencia energética en operaciones de separación

Las operaciones de separación continúan siendo uno de los puntos críticos en la producción de biocombustibles verdes. En varias rutas, como la destilación de bioetanol, la recuperación de biobutanol y la purificación de corrientes intermedias en procesos termoquímicos, estas operaciones pueden representar entre 40 % y 70 % del consumo energético total. Aunque la intensificación de procesos y la integración energética han permitido avances importantes, todavía persisten pérdidas térmicas, altos requerimientos de servicios auxiliares y limitaciones técnicas en etapas de purificación (Bazargan y col., 2022).

Un reto importante será desarrollar configuraciones híbridas que combinen membranas, destilación extractiva, adsorción regenerativa y separación acoplada a fermentación. Sin embargo, estas alternativas deben evaluarse con cuidado, ya que una reducción en consumo energético puede venir acompañada de mayor complejidad operativa, costos adicionales o nuevas restricciones de control. Por ello, se requieren modelos rigurosos y análisis multicriterio que integren desempeño técnico, costo e impacto ambiental desde las primeras etapas de diseño (Secinaro y col., 2020).

6.3 Escalado industrial de tecnologías de biocombustibles verdes: desafíos estructurales y el papel del PSE en la transición energética

El escalado industrial sigue siendo uno de los principales cuellos de botella para tecnologías emergentes de biocombustibles verdes, como rutas Alcohol-to-Jet (ATJ), fermentación

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

ABE y procesos de bioetanol intensificado. Estas tecnologías enfrentan limitaciones asociadas con estabilidad catalítica, inhibición por productos, cinética no lineal, complejidad operativa, disponibilidad de biomasa, inversión inicial e incertidumbre tecnológica. Por ello, su desarrollo requiere pasar de resultados prometedores a nivel laboratorio o piloto hacia configuraciones robustas y económicamente viables (Nabgan y col., 2023; Mühl & de Oliveira, 2022).

La literatura reciente muestra que estas barreras forman parte de un contexto más amplio, donde también influyen la madurez tecnológica, el avance de materiales catalíticos, el desarrollo de rutas termoquímicas y biológicas, y la búsqueda de procesos con menor huella ambiental. Estudios sobre nanomateriales, soportes mesoporosos, pirólisis, upgrading, hidrógeno renovable y sistemas catalíticos coinciden en que el escalado debe considerar eficiencia energética, estabilidad del proceso, disponibilidad de insumos y desempeño ambiental de manera conjunta (Qureshi y col., 2023; Bui y col., 2025; Thao y col., 2024; Raj y col., 2022; Ojha y col., 2023).

En este escenario, el PSE puede apoyar el escalado mediante simulación dinámica, diseño de superestructuras, optimización multiobjetivo, toma de decisiones multicriterio y análisis de sensibilidad. Estas herramientas permiten identificar cuellos de botella, comparar configuraciones, evaluar compromisos entre inversión, emisiones, eficiencia energética y disponibilidad de biomasa, así como estimar la incertidumbre en rendimiento y estabilidad a partir de datos experimentales o modelos predictivos (Zhang y col., 2022; Gürkan & Açıkel, 2022; Zhang y col., 2021; Ibrahim & Al-Mohannadi, 2023; Tan y col., 2022). Además, la inteligencia artificial puede complementar estos análisis al predecir desempeño de catalizadores, apoyar la optimización de condiciones de operación y reducir parte de la experimentación física intensiva, siempre que se cuente con datos representativos y validación experimental adecuada (Zhang y col., 2022; Yang y col., 2020).

Desde esta perspectiva, el escalado de biocombustibles verdes requiere articular innovación tecnológica, evaluación ambiental, optimización sistemática y herramientas digitales. El PSE no elimina por sí solo los riesgos técnicos o económicos, pero sí ofrece un marco útil para ordenarlos, cuantificarlos y compararlos antes de avanzar hacia etapas industriales.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

6.4 Integración con hidrógeno verde y captura de CO_2

La integración de procesos bioenergéticos con hidrógeno verde y captura, utilización y almacenamiento de CO_2 (CCUS) representa una oportunidad importante para desarrollar sistemas con menores emisiones netas. Rutas híbridas como el hidrotratamiento de bioaceites o la combinación de fermentación con upgrading catalítico pueden mejorar la calidad del combustible y ampliar las opciones de valorización de productos intermedios. Sin embargo, estas rutas también introducen nuevas demandas energéticas, restricciones termodinámicas y necesidades de integración entre unidades de reacción, separación y acondicionamiento de productos (Bazargan y col., 2022; Secinaro y col., 2020).

Desde el PSE, el reto consiste en construir modelos acoplados que permitan evaluar de manera conjunta el consumo de hidrógeno, la recuperación de carbono, los balances energéticos, las emisiones evitadas y los costos asociados. La captura y utilización de CO_2 no debe analizarse como una etapa aislada, sino como parte del diseño global del sistema. Esta integración es coherente con enfoques recientes de sostenibilidad multiescala, donde la evaluación ambiental y la optimización de procesos se consideran elementos centrales para decidir si una ruta realmente contribuye a reducir impactos (Ghosh y col., 2022).



Figura 24. Desafíos futuros del PSE 4.0 en biocombustibles verdes: biomasa, separaciones, escalado, captura de CO_2 y digitalización.

6.5 Requerimientos de digitalización y transición hacia PSE 4.0

La transición hacia biorefinerías inteligentes requiere capacidades digitales que aún son

limitadas en muchos sistemas bioenergéticos. La implementación de gemelos digitales, monitoreo en tiempo real, inteligencia artificial, aprendizaje automático y control avanzado demanda infraestructura de datos, sensores confiables, interoperabilidad entre plataformas y personal con formación tanto en ingeniería de procesos como en análisis de datos. Estos elementos son necesarios para que la digitalización no se quede solo como una propuesta conceptual, sino que pueda aplicarse en condiciones reales de operación (Yang y col., 2020; Mühl y de Oliveira, 2022).

Diversos estudios bibliométricos sobre energía y sistemas sostenibles señalan que la digitalización está modificando la forma en que se diseñan, operan y optimizan los procesos. Sin embargo, en el caso de los biocombustibles verdes, su adopción debe avanzar de manera gradual y vinculada con problemas concretos: variabilidad de biomasa, control de calidad, eficiencia energética, reducción de emisiones y toma de decisiones bajo incertidumbre. En este sentido, el PSE 4.0 puede entenderse como una extensión del PSE tradicional, más que como un reemplazo, al integrar herramientas computacionales y datos de proceso para apoyar biorefinerías más flexibles y con menor impacto ambiental (Zhang y col., 2022; Azad y Parvin, 2022).

7. Conclusiones

El análisis realizado permitió identificar que la Ingeniería de Procesos y Sistemas (PSE) ha adquirido un papel relevante en el estudio y desarrollo de biocombustibles verdes. La revisión de 389 documentos publicados entre 2003 y 2026 mostró una producción científica en crecimiento, con mayor presencia en revistas vinculadas con energía, sostenibilidad, ingeniería de procesos y evaluación ambiental. Este comportamiento indica que el tema ha pasado de contribuciones dispersas a una línea de investigación con mayor organización académica y técnica.

Los resultados bibliométricos también evidenciaron la presencia de revistas, autores y redes de colaboración que han contribuido a estructurar el campo. La participación de comunidades científicas de distintas regiones y la recurrencia de temas como conversión de biomasa, optimización, integración energética y evaluación ambiental muestran que el PSE funciona como un punto de conexión entre la ingeniería química, la bioenergía y la sostenibilidad.

ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Desde el punto de vista metodológico, el estudio identificó que las herramientas del PSE permiten analizar rutas de biocombustibles de manera integral. Los balances de materia y energía, el análisis exergético, la integración de calor, la programación matemática y el Análisis de Ciclo de Vida permiten comparar alternativas considerando no solo el rendimiento técnico, sino también el consumo energético, la viabilidad económica y el impacto ambiental.

Asimismo, se observó una transición hacia enfoques más digitales, asociados con inteligencia artificial, modelos híbridos, gemelos digitales, control avanzado y biorefinerías inteligentes. Estos enfoques amplían la capacidad del PSE para apoyar el diseño, la operación y la evaluación de procesos complejos, especialmente cuando existen variaciones en la biomasa, incertidumbre operativa o necesidad de tomar decisiones con múltiples criterios.

A pesar de estos avances, el estudio identificó desafíos importantes para la aplicación industrial de biocombustibles verdes. Entre ellos destacan la variabilidad y disponibilidad de la biomasa, el alto consumo energético en operaciones de separación, el escalado de tecnologías emergentes, la integración con hidrógeno verde y captura de CO_2, y la necesidad de infraestructura digital para operar biorefinerías más flexibles.

Este trabajo aporta una lectura integrada del PSE aplicado a biocombustibles verdes al combinar evidencia bibliométrica con una revisión crítica de metodologías, aplicaciones, tendencias y desafíos. Los hallazgos muestran que el PSE no debe entenderse como una solución única, sino como un marco de análisis que permite conectar desempeño técnico, costo, impacto ambiental y condiciones reales de operación para orientar el desarrollo de rutas bioenergéticas con mayor viabilidad técnica, ambiental y económica.

Referencias bibliográficas

Abioye, K. J., Harun, N. Y., Yusuf, M., Kamyab, H., Ighalo, J. O., & Al-Muhtaseb, A. H. (2024). RSM-based co-gasification of palm oil decanter cake and sugarcane bagasse: Syngas production and biochar characteristics. *Biomass & Bioenergy*, 191, 107482. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107482

Álvarez, B. R., Sánchez-Montañés, B., y García-Martínez, A. (2022). Building

material toxicity and life cycle assessment: A systematic critical review. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130838. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130838

Azad, A., y Parvin, S. (2022). Bibliometric analysis of photovoltaic thermal (PV/T) system: From citation mapping to research agenda. *Energy Reports*, 8, 2699–2711. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.184

Batista-Canino, R. M., Santana-Hernández, L., y Medina-Brito, P. (2023). A scientometric analysis on entrepreneurial intention literature. *Heliyon*, 9, e13046. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13046

Bazargan, A., Nejati, M., Hajikhani, H., Shafiee, Z., y Mehrizi, R. A. (2022). Cross-sectional study of the top research topics in environmental science and engineering. *Results in Engineering*, 14, 100465. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100465

Bui, T. T., Bui, T.-V., Do, Q.-D., Ngo, T. M. T., y Tran, H. N. (2025). Facile preparation of mesoporous alumina–silica catalysts derived from rice husk ash for fast catalytic pyrolysis of biomass. *Chemical Engineering Research and Design*, 215, 455–468. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.01.016

Funko, I. S., Vlačić, B., & Dabić, M. (2023). Corporate entrepreneurship in public sector: A systematic literature review and research agenda. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8, 100343. https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100343

Ghosh, R. C., Orchiston, C., y Mallick, B. (2022). Climate migration studies in the Pacific (CMSP) - A bibliometric analysis. *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 100132. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100132

Girardi, R., Galdino, J. F., Pellanda, P. C., Junior, J. A. F., y dos Santos, M. (2022). Bibliometric study on multi-criteria decision-making methods applied to life cycle management of defense systems. *Procedia Computer Science*, 214, 236–247. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.171

Gonçalves, C. L., Pereira, L., y Akkari, A. C. S. (2023). Bibliometric mapping of the research trends on software architecture for e-health systems. *Procedia Computer Science*, 219, 1462–1469. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.436

Gürkan, B., & Açıkel, Y. S. (2022). Superstructure-based optimization of integrated biorefinery systems for sustainable biofuel production. Computers & Chemical Engineering, 167, 108035.

Gutiérrez-Nieto, B., Ortiz, C., y Vicente, L. (2023). A bibliometric analysis of the disposition effect. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, 37, 100774. https://doi.org/10.1016/j.jbef.2022.100774

Ibrahim, Y., y Al-Mohannadi, D. M. (2023). Optimization of low-carbon hydrogen supply chain networks in industrial clusters. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(25), 9382–9401. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.090

Mühl, D. D., & de Oliveira, L. (2022). A bibliometric and thematic approach to Agriculture 4.0. *Heliyon*, 8, e09369. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09369

Nabgan, W., Ikram, M., Alhassan, M., Owgi, A., y col. (2023). Bibliometric analysis and an overview of the application of non-precious materials for pyrolysis reaction of plastic waste. *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 104717. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104717

Ojha, S., Singh, A., & Patel, R. (2023). Valorization of lignocellulosic biomass into value-added chemicals via green catalytic pathways. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 34, 101075.

Olaleye, S. A., Sanusi, I. T., Dada, O. A., y Agbo, F. J. (2023). A bibliometric review of global visibility, impact and adoption of electronic invoicing. *Heliyon*, 9, e13726. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13726

Omotehinwa, T. O. (2022). Examining the developments in scheduling algorithms research: A bibliometric approach. *Heliyon*, 8, e09510. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09510

Pang, T., y Shen, J. (2022). Visualizing the landscape and evolution of capacitive deionization by scientometric analysis. *Desalination*, 527, 115562. https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115562

Quesado, P., & Silva, R. (2021). Activity-based costing (ABC) and its implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and*

Complexity, 7, 41. https://doi.org/10.3390/joitmc7010041

Qureshi, F., Yusuf, M., Tahir, M., Haq, M., Mohamed, M. M. I., Kamyab, H., Nguyen, H. H. T., & Vo, D.-V. N. (2023). Renewable hydrogen production via biological and thermochemical routes: Nanomaterials, economic analysis, and challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 179, 68–88. https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.075

Qureshi, F., Yusuf, M., Ibrahim, H., Kamyab, H., Chelliapan, S., Pham, C. Q., & Vo, D.-V. N. (2023). Contemporary avenues of the hydrogen industry: Opportunities and challenges in the eco-friendly approach. *Environmental Research*, 229, 115963. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115963

Raj, J., Balan, A. V., & Kurian, M. (2022). Recent advances in nanocatalysts for biodiesel production: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 25, 100546.

Secinaro, S., Brescia, V., Calandra, D., y Biancone, P. (2020). Employing bibliometric analysis to identify suitable business models for electric cars. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121503. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121503

Tan, Y. D., Lim, J. S., Andiappan, V., y Wan Alwi, S. R. (2022). Systematic optimisation framework for a sustainable multi-owner palm-oil-based complex. *Energy*, 261, 125136. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125136

Thao, B. T. T., Bui, T.-V., Do, Q.-D., Nguyen, T. M., & Le, D. T. (2024). Effect of calcination temperature on mesoporous silica–alumina catalysts for catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass. Journal of the Energy Institute, 119, 101693.

Turulja, L., Vugec, D. S., & Bach, M. P. (2023). Big data and labour markets: A review of research topics. *Procedia Computer Science*, 217, 526–535. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.248

Ubando, A. T., Ng, E. A. S., Chen, W.-H., Culaba, A. B., y Kwon, E. E. (2022). Life cycle assessment of microalgal biorefinery: A state-of-the-art review. *Bioresource Technology*, 360, 127615. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127615

Yang, C., Kim, Y., Ryu, S., y Gu, G. X. (2020). Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks. Materials & Design, 189, 108509. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108509

Zhang, L., Ling, J., & Lin, M. (2022). Artificial intelligence in renewable energy: A comprehensive bibliometric analysis. Energy Reports, 8, 14072–14088. 20. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.347

Zhang, K., Yang, X., Tian, F., Miao, Z., Xia, H., y col. (2025). Effects of molding pressure on mechanical and sound insulation of sisal fiber/carbon fiber hybrid reinforced composites with sandwich structure. *Polymer Composites*, 46(14), 13052-13062. https://doi.org/10.1002/pc.29915

Zhang, Y., Pu, H., Ding, J., & Chang, J. (2021). Process modeling and multi-objective optimization of a hybrid renewable energy microgrid: A sustainability approach. Computers & Chemical Engineering, 153, 107636.