

Del campo al tanque: Desentrañando el verdadero impacto de los biocombustibles

Javier Alvarez-Vega ^{1,*}, J. Jesús Esparza-Claudio ² y V. Ekbalam Márquez-Baños ³

¹ Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02128, México

² Medio Ambiente y Biotecnología, CIATEC, Omega 201, Industrial Delta, C.P. 37545 León de los Aldama, Guanajuato.

³ Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma de Chapingo. Km. 38.5 Carretera México – Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 53230, México.

* Autor de correspondencia: al2171800278@azc.uam.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 28 de octubre de 2024

Publicado: 3 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.225>

Resumen: Este artículo examina el papel de los biocombustibles en la transición hacia una energía sostenible, empleando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como marco metodológico de evaluación. Se discuten las diversas generaciones de biocombustibles, desde la primera generación, que se basa en cultivos alimentarios, hasta opciones avanzadas como las algas y organismos genéticamente modificados. El enfoque "de la cuna a la tumba" (cradle-to-grave) del ACV facilita una evaluación integral de los impactos ambientales asociados con cada fase, desde el cultivo y la cosecha hasta el procesamiento, la distribución y el uso final. Aunque los biocombustibles se presentan como una alternativa prometedora a los combustibles fósiles, existe la necesidad de evaluar rigurosamente su verdadero impacto ambiental más allá de las reducciones directas de emisiones. Este estudio utiliza el ACV para examinar aspectos críticos como los efectos indirectos del cambio de uso de suelo, buscando proporcionar una visión más completa de su sostenibilidad real. Las innovaciones tecnológicas en producción y distribución, incluyendo biorrefinerías descentralizadas y la aplicación de microorganismos avanzados, están transformando el panorama de los biocombustibles. En conclusión, este análisis enfatiza que, aunque los biocombustibles son un elemento crucial en la búsqueda de un sistema energético sostenible, su verdadero potencial se realizará a través de una integración inteligente de las diferentes etapas de sus procesos productivos.

Palabras clave: biocombustibles; análisis de ciclo de vida (ACV); medición del impacto ambiental.

Introducción

En un mundo que busca urgentemente alternativas sostenibles a los combustibles fósiles, los biocombustibles emergen como una opción prometedora pero compleja. Este artículo se propone desentrañar los misterios de los biocombustibles, explorando su ciclo de vida desde el campo hasta el tanque de combustible. A través de un viaje fascinante por la ciencia y la tecnología detrás de estas fuentes de energía renovable, descubriremos cómo los biocombustibles podrían transformar nuestro futuro energético y qué desafíos debemos superar para aprovechar plenamente su potencial.

En la actualidad la creciente demanda de energía, el agotamiento de las reservas fósiles, la gestión sostenible de los residuos de cultivos y la preocupación por la contaminación han despertado la atención en la generación energética sostenible a partir de biomasa. Sin embargo, ¿son los biocombustibles realmente tan verdes como se presentan? Para responder a esta pregunta, es necesario examinar cada etapa de su ciclo de vida, desde la producción de la materia prima hasta su uso final. Es aquí donde entra en juego el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta que permite evaluar de manera integral el impacto ambiental de los biocombustibles. Este enfoque examina todas las fases de la vida de los biocombustibles: el cultivo y cosecha de la biomasa, procesamiento y conversión en combustible, incluyendo el transporte, distribución, y finalmente su uso. Este enfoque permite identificar no solo los beneficios, sino también los posibles efectos negativos que podrían pasar desapercibidos.

En este artículo, seguiremos el camino de los biocombustibles desde el campo hasta el tanque de combustible, favoreciendo una visión clara y matizada de su papel en nuestro futuro energético.

Desarrollo

¿Qué son los biocombustibles?

El término de biocombustible a pesar de ser un tópico que tiene varios años sobre el papel, es un concepto amplio y en ocasiones simplificado. Comúnmente hace referencia a líquidos para el transporte, derivados de materia orgánica (UNCTAD, 2009). Sin embargo, el campo es más diverso, con varias generaciones de biocombustibles:

- Primera generación. Derivados directamente de cultivos alimentarios.
- Segunda generación. La materia prima son residuos sin valor alimentario de cultivos del tipo alimentario o no alimentario.
- Tercera generación: Derivados de micro y macro algas.
- Cuarta generación: Obtenidos de organismos genéticamente modificados.

El término 'generación' se refiere a la evolución tecnológica y las diferentes fuentes de materia prima utilizadas. A los biocombustibles de segunda, tercera y cuarta generación se les conoce como biocombustibles avanzados (Malik, 2024), estos son generalmente más sostenibles y presentan menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Singhvi, 2022). Los GEI son gases atmosféricos que contribuyen al calentamiento global, siendo el CO₂ (dióxido de carbono) el más común.

La principal razón por la que los biocombustibles han ganado tanta relevancia es por el potencial para reducir emisiones netas de GEI en comparación con los combustibles fósiles. Esto se debe a su ciclo de carbono. Para comprender mejor este proceso, es importante familiarizarse con algunos conceptos:

- Biomasa: Material orgánico derivado de organismos, que compone la materia prima de los biocombustibles.
- Ciclo de carbono: Proceso de intercambio de carbono entre la atmósfera, océanos, suelo y seres vivos.
- CO₂: Gas de efecto invernadero producido por la combustión, principal contribuyente al cambio climático.
- Absorción: Proceso por el cual las plantas capturan CO₂ atmosférico durante la fotosíntesis, convirtiéndolo en materia orgánica.

En la Figura 1 se presenta el ciclo de carbono de los combustibles fósiles y de los biocombustibles, ilustrando cómo estos procesos se interrelacionan:

- La biomasa utilizada para producir biocombustibles absorben CO₂ de la atmósfera durante su crecimiento a través de la fotosíntesis.
- Cuando se queman los biocombustibles, se libera CO₂, pero esta cantidad es aproximadamente igual a la que fue absorbida por las plantas durante su crecimiento.
- En contraste, los combustibles fósiles liberan CO₂ que ha estado almacenado bajo tierra durante millones de años, añadiendo nuevo carbono a la atmósfera.

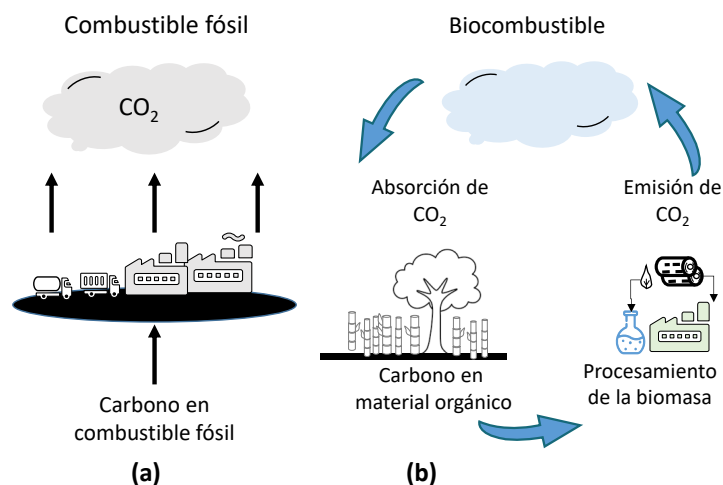


Figura 1. Esquema del ciclo de carbono (a) Combustibles fósiles, (b) biocombustibles.

Estudios han demostrado que, dependiendo del tipo de biocombustible y su método de producción, las reducciones en las emisiones de GEI pueden variar del 20% al 90% en comparación con los combustibles fósiles (Wang, 2012). Sin embargo, es importante considerar que estos beneficios dependen de prácticas de producción sostenible y de evitar cambios negativos en el uso de la tierra.

Fundamentos del análisis de ciclo de vida ¿Qué es? ¿Para qué sirve? ¿En qué consiste?

Después de plantear la pregunta crucial sobre la verdadera sostenibilidad de los biocombustibles, es fundamental comprender cómo el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) nos proporciona una visión completa y detallada. El ACV es una herramienta esencial para evaluar de manera integral el impacto ambiental de los biocombustibles. Imaginemos que estamos siguiendo el viaje de una gota de biocombustible, desde su nacimiento en un campo de cultivo hasta su uso final en un motor. Este viaje, que a primera vista puede parecer simple, está lleno de giros inesperados y revelaciones sorprendentes que solo el ACV puede desentrañar.

En el caso de los biocombustibles, se emplea específicamente un ACV "de la cuna a la tumba" (cradle-to-grave), que examina el producto desde la extracción de materias primas (la "cuna") hasta su disposición final (la "tumba"). Este enfoque es particularmente relevante para los biocombustibles, ya que permite evaluar sus impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida.

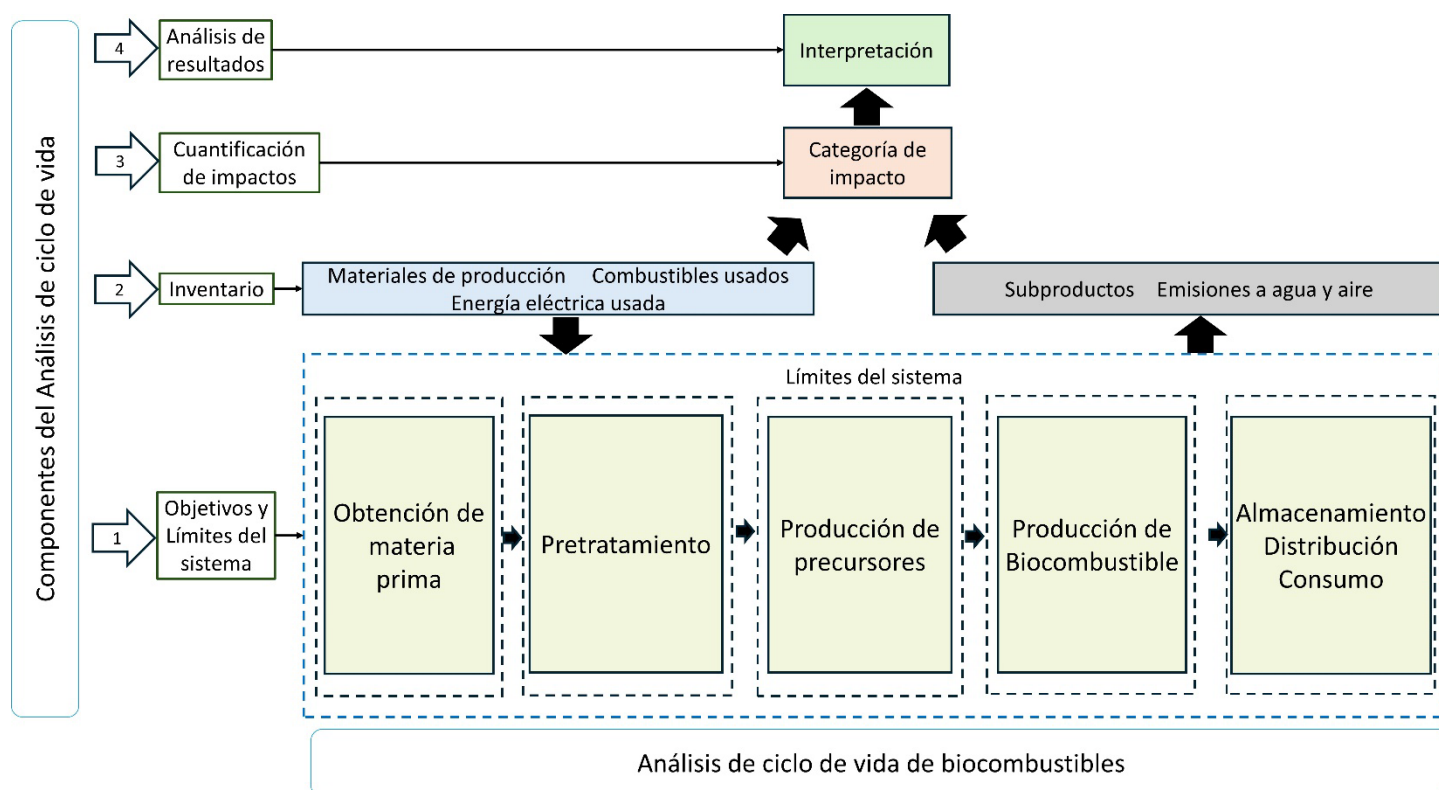


Figura 2. Esquema general de análisis de ciclo de vida para evaluación de biocombustibles.

Para visualizar mejor este proceso, la Figura 2 nos muestra un esquema general del ACV, que se divide en cuatro etapas:

1. Definición de alcances y límites del sistema.
2. Inventarios de ciclo de vida (ICV).
3. Evaluación del impacto.
4. Análisis e interpretación.

Una definición más formal del ACV es la "recopilación y evaluación de las entradas, salidas y posibles impactos ambientales de un sistema de un producto a lo largo de su ciclo de vida" (ISO, 2006).

Es importante destacar que el ACV es solo una parte de un análisis de sustentabilidad más amplio. Este análisis requiere un enfoque multicriterio que va más allá de los aspectos puramente ambientales (Lora, 2011). Este enfoque considera simultáneamente aspectos económicos y sociales para una evaluación más completa de la sostenibilidad.

A fin de ilustrar la aplicación del ACV en la práctica, consideremos el ejemplo de CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), un programa global propuesto por la ICAO (International Civil Aviation Organization) para reducir el impacto de las emisiones de GEI de la industria de la aviación (ICAO, 2022):

1. Definición de alcances y límites: CORSIA considera todo el ciclo de vida del combustible, desde la producción de la materia prima hasta su combustión en los motores de los aviones.
2. ICV: Contabiliza todas las emisiones de GEI en cada etapa de vida del biocombustible, incluyendo el cultivo de la biomasa, su procesamiento, transporte y uso final.
3. Evaluación del impacto: CORSIA compara las emisiones totales de GEI del biocombustible con las del combustible fósil que reemplaza, calculando la reducción neta de emisiones.
4. Análisis e interpretación: Solo los biocombustibles que demuestran una reducción significativa de emisiones (mínimo 10% menos que el combustible convencional) son elegibles.

Los estudios de ACV aplicados a biocombustibles generalmente se enfocan a las emisiones de GEI. Por ejemplo, el biodiesel muestra una reducción del 63-77 % de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ en comparación con el diésel fósil y de 64-67% si existen cambio de uso del suelo (Xu, 2022). El bioetanol, puede reducir las emisiones de 519.12 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ a 84.99 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ si se compara la quema de residuos contra su conversión (Patel, 2024). Es importante aclarar dos conceptos clave en estos resultados:

1. El $\text{CO}_{2\text{eq}}$ es un término que significa dióxido de carbono equivalente. Es una medida estándar, expresa el impacto de diferentes GEI en términos de la cantidad de CO_2 que tendría un impacto equivalente en el calentamiento global.
2. Cambio de uso del suelo. Se refiere a la transformación de un área de tierra de un uso o cobertura a otro, por ejemplo, de bosque a tierra de cultivo. Es crucial en el ACV de biocombustibles, debido a que puede tener impactos significativos en las emisiones de carbono y la biodiversidad. La transformación de tierras naturales puede fragmentar hábitats y alterar servicios ecosistémicos.

Con una comprensión clara del ACV y sus etapas, podemos comenzar nuestro viaje a través de las distintas fases de los biocombustibles.

El campo de batalla: Cultivo y cosecha

El viaje comienza en vastos campos de cultivo. Aquí, la naturaleza y la tecnología libran una batalla silenciosa. Los cultivos tradicionales, aunque conocidos y bien establecidos, son insaciables consumidores de agua y nutrientes. Las nuevas tendencias apuntan hacia cultivos resistentes a la sequía y plantas perennes que reducen la necesidad de labranza anual, disminuyendo la erosión del suelo y el consumo de combustible asociado a su producción.

La biotecnología está jugando un papel crucial en este campo de batalla. El desarrollo científico se ha enfocado a la creación de variedades de cultivos que no solo son más eficientes en la producción de biocombustibles, sino que también pueden crecer en tierras marginales, evitando así la competencia con la producción de alimentos (Mehmood, 2017). Imaginen plantas que actúan como fábricas en miniatura, optimizadas para producir los compuestos puntuales necesarios para producir biocombustibles (Loqué, 2015). Además de los cultivos primarios, el incremento de los rendimientos también ha generado incrementos en los residuos, como son rastrojos, hojas, vainas de semillas, etc. Primordialmente estos residuos son usados como alimento de ganado. Sin embargo, una cantidad considerable de estos residuos se deja sin utilizarse, siendo la eliminación de estos residuos un desafío importante (Bentsen, 2014).

Los ACV revelan diferencias significativas entre las materias primas para producir biocombustibles. En la literatura científica se reportan rangos de 3 a 162 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ de etanol de primera generación (80.4 a 4337.6 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{L}$) y -115 a 173 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ de segunda generación (-3082 a 4632.4 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{L}$) (Jeswani, 2020). Seghetta *et al.* (2016) realizaron un ACV para bioetanol de tercera generación usando macroalgas y encontraron en su escenario base beneficios climáticos con emisiones de -13.6 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{L}$. En contraste, el bioetanol de segunda generación de caña de azúcar presenta emisiones de 748.6 g $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{L}$ (Liu, 2023), a pesar de presentar emisiones positivas muestra una reducción de emisiones del 62% comparándolo con combustible fósil (gasolina).

La alquimia moderna: Procesamiento y producción

Una vez que la biomasa ha sido cultivada y cosechada, o bien generada como residuo en otros procesos, el siguiente paso es su procesamiento. En esta etapa, la biomasa se convierte en biocombustible a través de procesos avanzados, cada vez más sofisticados y con tendencias hacia la economía circular y la optimización de procesos. La tendencia actual se aleja de los métodos tradicionales de fermentación y destilación, que son intensivos en consumo energético, hacia tecnologías de vanguardia como la pirólisis flash y la gasificación de biomasa (Osman, 2021).

Estas nuevas tecnologías no solo son más eficientes energéticamente, sino que también pueden procesar una gama más amplia de materias primas, incluyendo residuos agrícolas y forestales (Zabed, 2017). Imaginen una planta de procesamiento que puede convertir prácticamente cualquier tipo de biomasa en biocombustible, adaptándose a las materias primas disponibles localmente y reduciendo los costos de transporte.

Pero la verdadera revolución está ocurriendo a nivel molecular. Los científicos están diseñando microorganismos personalizados capaces de descomponer la biomasa y producir biocombustibles avanzados con una eficiencia sin precedentes (Peralta-Yahya, 2012). Estos pequeños trabajadores microscópicos podrían ser la clave para producir biocombustibles que no solo igualen, sino que superen el rendimiento energético de los combustibles fósiles.

El viaje invisible: Distribución y uso

La producción de biocombustibles representa un desafío tecnológico fascinante, pero su distribución retos únicos. Una vez producido, el siguiente desafío es su distribución y uso. Esta fase, menos visible, es crucial para garantizar que los biocombustibles sean rentables, sostenibles y utilizados como remplazo de los combustibles fósiles (Yue, 2014). La logística de distribución, aunque menos glamurosa, es un campo fértil para la innovación.

Uno de los principales problemas en la logística del transporte de biocombustibles son sus características. Por ejemplo, el bioetanol y el biodiesel suelen ser más corrosivos que los combustibles fósiles, dificultando su distribución por ductos (principal fuente de transporte de combustibles fósiles). Además, su solubilidad en agua puede causar efectos contaminantes en caso de derrames (Lim, 2016; Yue, 2014). Por ello, el transporte hacia las terminales de distribución se realiza por tren, barcas, o camiones, limitando el envío de grandes volúmenes. Además, requiere almacenamiento y mezcla con combustibles fósiles, i.e. etanol con gasolina, biodiesel con diésel, SAF con JET-A1 (queroseno). Tras estas mezclas, el biocombustible debe ser enviado a estaciones minoristas en camiones cisterna. Cuando las distancias entre las fuentes de biomasa y las áreas de consumo son cortas, los impactos ambientales son bajos. Sin embargo, los biocombustibles son menos atractivos conforme se incrementan estas distancias (Yue, 2014), debido al incremento en las emisiones de GEI y a los costos asociados. Algunas tendencias apuntan hacia la producción descentralizada, es decir, pequeñas biorrefinerías ubicadas cerca de las fuentes de biomasa y los puntos de consumo (Ding, 2021). Esto puede reducir costos y emisiones, además de crear oportunidades económicas en áreas rurales (Arias, 2023). Lan *et al.* (2020) reportan que los sistemas de biorrefinería centralizados presentan emisiones de 43.2 a 76.6 g CO_{2eq}/MJ, mientras que los sistemas descentralizados tienen incrementos del 11.1% al 42.1% debido al consumo energético del secado de biomasa. Exponen que la escala de producción también influye, por lo que la elección entre un sistema centralizado o descentralizado debe considerar tanto la capacidad de producción como el impacto ambiental.

En cuanto al uso final, la investigación se está moviendo más allá de los motores de combustión interna tradicionales. Los biocombustibles están encontrando nuevos nichos en la aviación, el transporte marítimo y la generación de electricidad. En el sector de la aviación, el SAF ofrece una reducción significativa de emisiones de GEI. Esto se debe a que las emisiones de combustión de los combustibles convencionales de aviación representan el 83% (74 g CO_{2eq}/MJ) de sus emisiones totales de ciclo de vida. Los SAF logran neutralizar estas emisiones gracias al CO₂ capturado durante el crecimiento de la biomasa utilizada en su producción (Prussi, 2021).

Conclusiones

El análisis de ciclo de vida de los biocombustibles revela un panorama complejo pero prometedor. La innovación está remodelando cada etapa del proceso, desde cultivos diseñados genéticamente hasta biorrefinerías de próxima

generación, mientras que la integración de tecnologías de captura de carbono y la exploración de materias primas no convencionales como las algas continúan expandiendo las posibilidades del sector.

Sin embargo, nuestro análisis también ha identificado desafíos significativos que requieren atención inmediata: los impactos indirectos del cambio de uso del suelo y sus efectos sobre la biodiversidad. La comprensión de estos factores a través del ACV resulta fundamental para el desarrollo de políticas y estrategias que maximicen los beneficios de los biocombustibles mientras minimizan sus impactos negativos.

Mirando hacia el futuro, los biocombustibles representan una pieza clave en la transición energética, pero su éxito dependerá de su integración inteligente con otras fuentes de energía renovable y sistemas de gestión energética avanzados. El ACV continuará siendo una herramienta esencial para guiar este desarrollo, permitiéndonos tomar decisiones informadas que equilibren las necesidades energéticas actuales con la sostenibilidad a largo plazo.

Bibliografía

- Arias, A. F. (2023). Biorefineries as a driver for sustainability: Key aspects, actual development and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 418, 137925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137925>.
- Bentsen, N. S. (2014). Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progress in energy and combustion science*, 40, 59-73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>.
- Ding, Z. &. (2021). Development of biorefineries in the bioeconomy: A fuzzy-set qualitative comparative analysis among European countries. *Sustainability*, 14(1), 90. <https://doi.org/10.3390/su14010090>.
- ICAO. (2022). *CORSIA Eligible Fuels - Life Cycle Assessment Methodology*. ICAO.
- ISO. (2006). *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*. ISO 14044:2006(E). International Standards Organization.
- Jeswani, H. K. (2020). Environmental sustainability of biofuels: a review. *Proceedings of the Royal Society A*, 476(2243), 20200351. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0351>.
- Lan, K. O. (2020). Life cycle analysis of decentralized preprocessing systems for fast pyrolysis biorefineries with blended feedstocks in the southeastern United States. *Energy Technology*, 8(11), 1900850. <https://doi.org/10.1002/ente.201900850>.
- Lim, M. K. (2016). Biofuel supply chain network design and operations. In A. Atasu, *Environmentally responsible supply chains* (pp. 143-162). Springer.
- Liu, X. K. (2023). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Brazilian Sugar Cane Ethanol Evaluated with the GREET Model Using Data Submitted to RenovaBio. *Environmental Science & Technology*, 57(32), 11814-11822. doi:10.1021/acs.est.2c08488
- Loqué, D. S. (2015). Engineering of plant cell walls for enhanced biofuel production. *Current opinion in plant biology*, 25, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.05.018>.
- Lora, E. E. (2011). Issues to consider, existing tools and constraints in biofuels. *Energy*, 2097-2110. doi:10.1016/j.energy.2010.06.012
- Malik, K. C. (2024). Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Fuels*, 157-175. <https://doi.org/10.3390/fuels5020010>.
- Mehmood, M. A. (2017). Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustainable Production and Consumption*, 9, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003>.
- Osman, A. I.-H.-M. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 4075-4118. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>.
- Patel, K. &. (2024). Sustainable waste management: a comprehensive life cycle assessment of bioethanol production from agricultural and municipal waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34612-z>.
- Peralta-Yahya, P. P. (2012). Microbial engineering for the production of advanced biofuels. *Nature*, 428(7411), 320-328. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00577-w>.
- Prussi, M. L. (2021). CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>.
- Seghetta, M. H. (2016). Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers—a step towards a regenerative bioeconomy. *Journal of Cleaner production*, 137, 1158-1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.195>.
- Singhvi, M. Z. (2022). Sustainable strategies for the conversion of lignocellulosic materials into biohydrogen: Challenges and solutions toward carbon neutrality. *Energies*, 15(23), 8987. <https://doi.org/10.3390/en15238987>.
- UNCTAD. (2009). *The biofuels market: current situation and alternative scenarios*. UN.
- Wang, M. H. (2012). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Environmental research letters*, 7(4), 045905. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>.
- Xu, H. O. (2022). Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7512-7521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>.
- Yue, D. Y. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36-56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>.
- Zabed, H. S. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>.