

Co-producción de bioetanol y bioproductos en procesos intensificados: hacia la factibilidad económica de la bioindustria

Co-production of bioethanol and bioproducts in intensified processes: towards the economic feasibility of the bioindustry

Yulissa Mercedes Espinoza-Vázquez

Fernando Israel Gómez-Castro*

Eduardo Sánchez-Ramírez

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México

Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

* fgomez@ugto.mx

Fecha de recepción: 16 de diciembre del 2023

Fecha de aceptación: 21 de junio del 2024

Resumen

Los biocombustibles derivados de residuos de biomasa lignocelulósica presentan una alternativa sostenible al permitir la reutilización de desechos y la sustitución de combustibles fósiles. No obstante, la rentabilidad de la producción de biocombustibles sigue siendo limitada, lo que ha impulsado la adopción de un enfoque de producción simultánea de otros bioproductos mediante esquemas de biorrefinería. Entre los biocombustibles, el bioetanol se destaca por su capacidad para sustituir a la gasolina en ciertos porcentajes. En cuanto a los bioproductos de alto valor agregado, se puede mencionar al furfural y el ácido láctico. A pesar de estas opciones, su viabilidad puede verse comprometida si no se establecen esquemas competitivos económicamente frente a las fuentes fósiles. En este contexto, la intensificación de procesos desempeña un papel crucial, ya que podría contribuir a desarrollar procesos más compactos y con menor consumo de energía. Este estudio realiza un análisis de las propuestas existentes en los procesos de conversión de biomasa a bioetanol, así como en los procesos de purificación de bioproductos como el ácido láctico y el furfural, y abarca tanto métodos convencionales como intensificados. El objetivo es resaltar el esquema de biorrefinería y explorar el potencial de



la co-producción de bioetanol y bioproductos, considerando tanto la perspectiva económica como la ambiental.

Palabras clave: ácido láctico, biorrefinería, furfural, intensificación de procesos

Abstract

Biofuels derived from lignocellulosic biomass residues present a sustainable alternative, by enabling the reuse of waste materials and replacing fossil fuels. However, the profitability of biofuel production remains limited, prompting the adoption of a simultaneous production approach for other bioproducts through biorefinery schemes. Among biofuels, bioethanol stands out for its ability to replace gasoline in certain percentages. High value added bioproducts include furfural and lactic acid. Despite these options, their viability may be compromised if economically competitive schemes compared to fossil sources are not established. In this context, process intensification plays a crucial role, as it could help develop more compact processes with reduced energy consumption. This study analyzes existing proposals for the conversion processes of biomass to bioethanol, as well as the purification processes of bioproducts such as lactic acid and furfural, covering both conventional and intensified methods. The objective is to highlight the biorefinery scheme and explore the potential for the co-production of bioethanol and bioproducts, considering both economic and environmental perspectives.

Keywords: lactic acid, biorefinery, furfural, process intensification

Introducción

El uso de combustibles fósiles presenta desventajas ambientales significativas, ya que se obtienen de fuentes no renovables y emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero al quemarse. A pesar de estas desventajas, su consumo se ha mantenido constante a lo largo de los años; en 2021 representaron el 77% del sistema energético mundial, el mismo porcentaje que hace 30 años (Ritchie *et al.*, 2022). Ante la necesidad urgente de cambiar las estrategias para satisfacer las demandas energéticas de la humanidad, surge el concepto de biocombustibles. Los biocombustibles son combustibles renovables generados mediante el procesamiento de biomasa. En este contexto, la biomasa se define como cualquier material orgánico renovable proveniente de plantas y animales. Específicamente en México, existe una abundancia de

residuos agrícolas, como bagazo, rastrojo, entre otros; estos materiales se conocen como biomasa lignocelulósica y están compuestos generalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyo porcentaje depende del tipo de cultivo y características, tal como muestra la Tabla 1.

Tabla 1

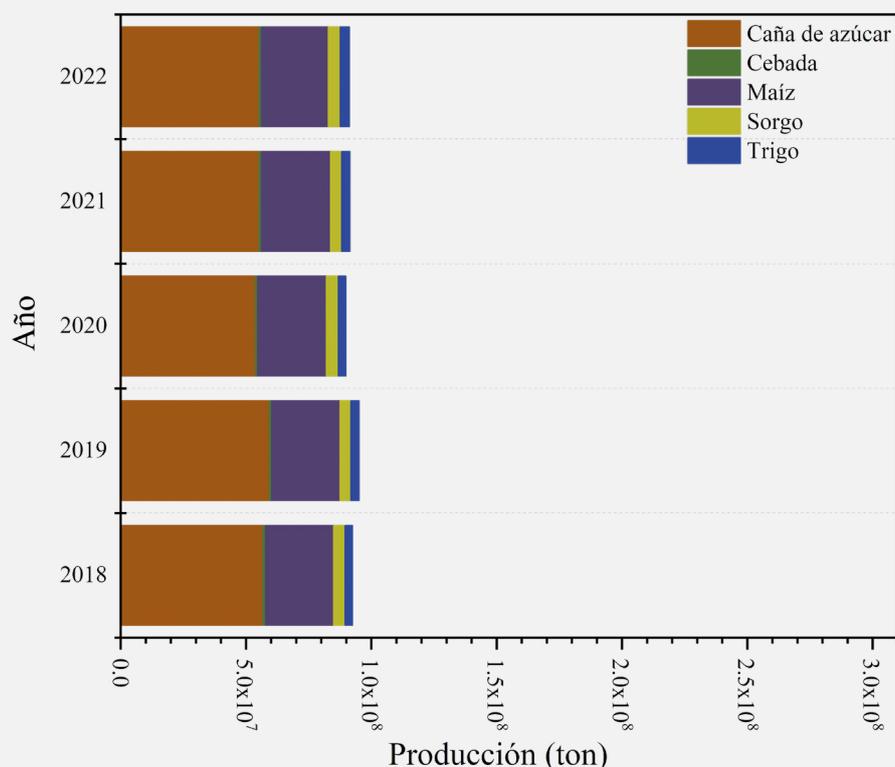
Composición de biomasa lignocelulósica
(Garrot *et al.*, 1999; Kumar-Saini *et al.*, 2014)

| | Bagazo de caña de azúcar | Rastrojo de maíz | Rastrojo de trigo | Rastrojo de cebada | Rastrojo de sorgo |
|--------------|--------------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Celulosa | 40-41.3 | 38-40 | 33-38 | 31-45 | 32 |
| Hemicelulosa | 27-37.5 | 28 | 26-32 | 27-38 | 24 |
| Lignina | 10-20 | 7-21 | 17-19 | 14-19 | 13 |

Los rastrojos son una fuente de material lignocelulósico para la producción de bioenergía (O'Connell *et al.*, 2007), desafortunadamente, el 20% de los residuos de este tipo se suele quemar después de la cosecha del grano con la finalidad de eliminar los materiales de desecho del campo (Damián-Huato y col., 2013; Law Corner, 2021). Al realizar esta actividad se contribuye significativamente a la contaminación del aire, ya que se generan gases de efecto invernadero, por ello es importante considerar rutas de aprovechamiento y valorización para estos desechos. Específicamente en México, existe un gran potencial para la producción de biocombustibles provenientes principalmente de residuos de caña de azúcar, maíz, trigo, cebada y sorgo. La Figura 1 muestra que la producción de estos cultivos entre 2018 y 2022 supera un promedio anual de 90,000,000 toneladas (FAO, 2023). México es responsable del 2.88% de la producción mundial de caña de azúcar, el 0.63% de cebada, el 2.29% de maíz, el 8.26% de sorgo y el 0.44% de trigo, esta constancia en la producción ofrece un área de oportunidad significativa para la valorización de residuos lignocelulósicos. Por lo tanto, la producción de biocombustibles a partir de estos desechos contribuye a resolver ambas problemáticas, pues se aprovecha una fuente abundante de biomasa y se reduce la contaminación ambiental.

Figura 1

Producción anual de cultivos en toneladas, del 2018 al 2022.
(FAO, 2023).



Es importante mencionar que la producción de biocombustibles, por sí misma, no es totalmente rentable (Reboredo *et al.*, 2017). Esto evidencia la necesidad de aprovechar de forma integral la biomasa disponible, lo cual es posible si se producen simultáneamente bioproductos de alto valor agregado. Estos bioproductos, al ser añadidos a la producción de biocombustibles, pueden mejorar los indicadores económicos del esquema productivo, ejemplos de tales productos son el furfural y el ácido láctico, que se generan en cantidades significativas durante el proceso de conversión de biomasa a bioetanol, lo que significa que existe la posibilidad de desarrollar esquemas para la purificación de estos subproductos. Sin embargo, a pesar de la producción simultánea de bioetanol y bioproductos, es posible que no se alcance aún la factibilidad económica en comparación con la obtención de estos a partir de combustibles fósiles debido al costo adicional asociado a la purificación de los coproductos. En este aspecto, surge la intensificación de procesos (PI, por sus siglas en inglés), que se define como una mejora de un proceso a nivel operativo y/o funcional obtenida mediante la integración de operaciones unitarias (Lutze *et al.*, 2013). PI desempeña un papel clave al promover el desarrollo

de procesos compactos, con consumo de energía reducido, más seguros y respetuosos con el medio ambiente.

En la literatura existen diversos artículos referentes a la obtención de bioetanol a partir de residuos de maíz (Tan *et al.*, 2013), residuos de trigo (Talebnia *et al.*, 2010), entre otras materias primas. No obstante, no se menciona el aprovechamiento de los componentes inhibidores, lo cual podría realzar el enfoque de biorrefinería, que se refiere a una instalación que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para la producción de combustibles, electricidad y productos químicos. En este artículo se presentan generalidades sobre los procesos de transformación de residuos agroindustriales en bioetanol y bioproductos de alto valor agregado, en particular furfural y ácido láctico. Se analizan tanto los esquemas convencionales como las propuestas en esquemas intensificados con el fin de destacar el mejor diseño y permitir en el futuro la integración en un único proceso teniendo en cuenta indicadores económicos y ambientales.

Conversión de residuos a bioetanol

La producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos implica una serie de etapas, desde la descomposición de la estructura de la materia prima hasta la separación del bioetanol con la pureza deseada, tal como se muestra en la Figura 2. El primer paso es el pretratamiento, que consiste en separar la lignina de la celulosa y la hemicelulosa presentes en la biomasa (Mankar *et al.*, 2021). Esta separación es esencial para las etapas posteriores de conversión (hidrólisis y fermentación), ya que la lignina dificulta el acceso de los reactivos empleados en la hidrólisis hacia la celulosa y la hemicelulosa. Los pretratamientos de la biomasa lignocelulósica deben de cumplir ciertos requisitos, que incluyen:

- Aumentar la producción de los azúcares pentosa y hexosa.
- Evitar la pérdida de compuestos azucarados.
- Tener una baja producción de compuestos inhibidores.
- Ser un proceso económicamente viable y respetuoso con el medio ambiente.

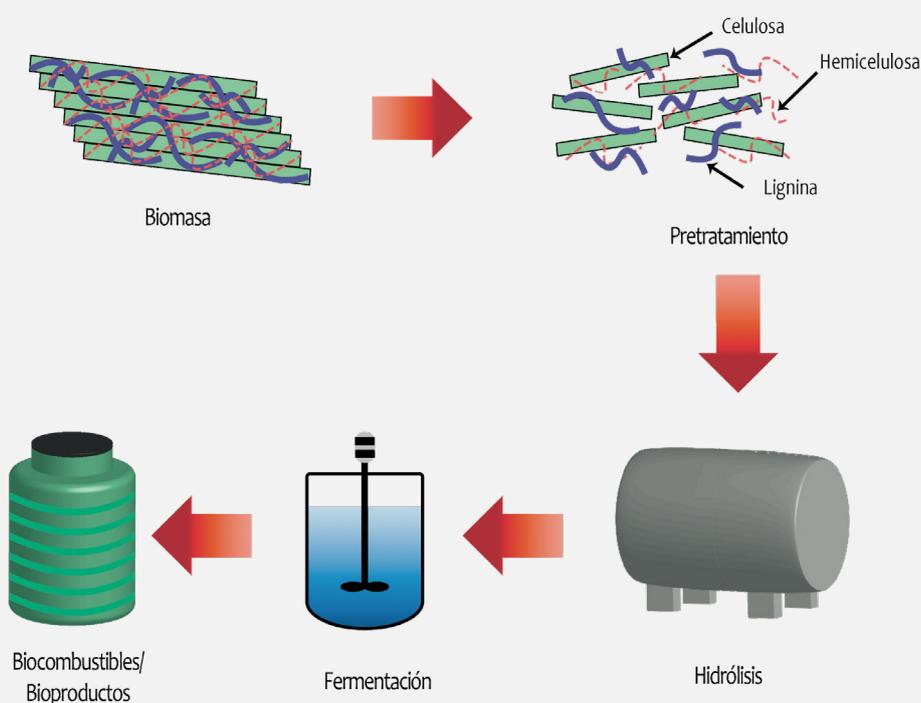
Entre los métodos de pretratamiento con mayores rendimientos se encuentran la explosión de agua caliente líquida (LHW, por sus siglas en inglés), la explosión de vapor de agua (SE, por sus siglas en inglés), la explosión de fibra de amoníaco (AFEX, por sus siglas en inglés), y el ácido diluido (DA, por sus siglas

en inglés) (Conde-Mejía, *et al.*, 2012). El método de explosión de agua caliente líquida utiliza vapor (180-240 °C) bajo presión (1-3.5 MPa) para interrumpir la unión de los componentes poliméricos y descomprimir la estructura de la celulosa (Shrotri *et al.*, 2017; Bandyopadhyay-Ghosh *et al.*, 2015). El método de agua caliente líquida es similar, pero emplea agua caliente a temperaturas entre 170 y 230 °C (Shah *et al.*, 2022). Durante este pretratamiento, la mayor parte de la hemicelulosa se solubiliza, lo que provoca que la celulosa sea más accesible, mientras que la lignina permanece en la fase sólida. En la explosión de fibra de amoníaco, los materiales lignocelulósicos se exponen a amoníaco concentrado líquido a alta presión, seguido de una rápida reducción de presión (Kumar *et al.*, 2009). Finalmente, el pretratamiento con ácido diluido consiste en la hidrólisis del material lignocelulósico mediante ácidos, típicamente ácido sulfúrico, clorhídrico o fosfórico en concentraciones del 1% al 10%, a temperaturas moderadas, en el rango de 100 °C a 180 °C (Wingren *et al.*, 2003). Las principales ventajas de este método son que el ácido puede penetrar en la lignina sin necesidad de otros pretratamientos como los enzimáticos, bacterianos, de alta presión o temperatura, y que la velocidad de la hidrólisis ácida es más rápida que la enzimática (Hong *et al.*, 2012).

Figura 2

Proceso de conversión de biomasa.

Modificado de Osman *et al.* (2021).



De los procesos previamente mencionados para la biomasa lignocelulósica, el pretratamiento con ácido diluido ha demostrado mejores rendimientos, menores costos de operación y un mejor compromiso con el medio ambiente (Conde-Mejía *et al.*, 2012). Posterior al proceso de pretratamiento, se realiza la hidrólisis, cuyo objetivo es descomponer la celulosa y hemicelulosa presentes en la materia prima en azúcares fermentables (monómeros de azúcar) para la producción de bioetanol. Una vez realizada, se lleva a cabo la fermentación, que implica la conversión de los azúcares monoméricos obtenidos en el paso previo mediante microorganismos como levaduras, hongos o bacterias (Senatore *et al.*, 2020). El microorganismo más utilizado es la levadura *Saccharomyces cerevisiae* debido a su compatibilidad con las altas temperaturas involucradas en la hidrólisis enzimática y su tolerancia a elevadas concentraciones de bioetanol (Tse *et al.*, 2021). Bajo condiciones anaeróbicas, esta levadura produce acetaldehído, que se reduce a bioetanol, lo que aumenta su rendimiento (Claassen *et al.*, 1999).

Para mejorar el desempeño de la ruta de conversión hacia bioetanol se han desarrollado diversas tecnologías para la conversión de azúcares monoméricos, entre las cuales se incluyen:

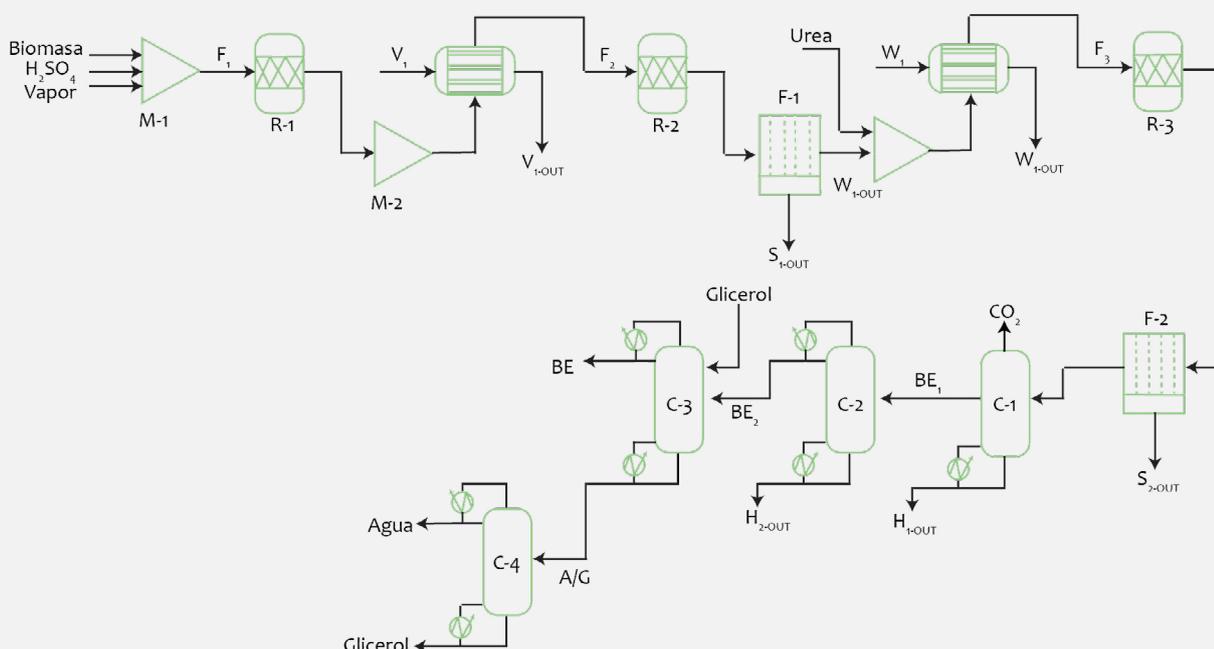
- **Hidrólisis y fermentación separadas:** La generación de enzimas, hidrólisis, y la fermentación de hexosas y pentosas se llevan a cabo en reactores individuales (Hahn-Hagerdal *et al.*, 2007).
- **Sacarificación y fermentación simultáneas:** La hidrólisis de la celulosa y la fermentación de la hexosa se realizan simultáneamente en el mismo reactor, lo que supera la inhibición de la celulosa debido al consumo instantáneo de azúcares por parte de los microorganismos fermentadores (Hahn-Hagerdal *et al.*, 2007).
- **Sacarificación y co-fermentación simultáneas:** Se utilizan dos cepas genéticamente modificadas de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y de bacterias *Zymomonas mobilis* para co-fermentar glucosa y xilosa en el mismo reactor (Osman *et al.*, 2021).
- **Hidrólisis y co-fermentación separadas:** Integra la hidrólisis enzimática de la celulosa y la co-fermentación en un proceso simultáneo (Conde-Mejía *et al.*, 2013).

Cuando se utiliza la co-fermentación no es necesaria la separación sólido-líquido, esto permite que la mezcla de biomasa no reaccionada y los azúcares formados pueda enviarse directamente al siguiente paso. De las tecnologías mencionadas, la

hidrólisis y co-fermentación separadas es una de las mejores opciones desde el punto de vista económico (Conde-Mejía et al., 2013). Después de la conversión, se debe realizar un proceso de separación para extraer todos los productos secundarios formados y el agua del bioetanol y respecto a estos, la destilación es uno de los más utilizados debido a su capacidad para separar mezclas en grandes cantidades con alta pureza, basándose en la diferencia de los puntos de ebullición de los componentes (Kooijman y Sorensen, 2022). En la Figura 3 se muestra un ejemplo del diagrama del proceso de conversión de biomasa a bioetanol, desarrollado por Espinoza-Vázquez et al. (2023a). En este diagrama, R-1, R-2 y R-3 son los reactores de pretratamiento, hidrólisis y fermentación, respectivamente. F-1 y F-2 son separadores de sólidos para extraer la biomasa no reaccionada de los flujos de alimentación. C-1, C-2 y C-3 son las columnas de destilación para obtener bioetanol con una pureza del 99%. En los hervidores de C-1 y C-2 se eliminan los productos secundarios, dejando solo bioetanol y agua que entran a la columna C-3, donde se lleva a cabo una destilación extractiva que utiliza glicerol como agente extractante (Segovia-Hernández et al., 2014). Finalmente, la columna C-4 se encarga de recuperar el glicerol con una pureza del 99%. Este proceso tiene un CAT (Costo Total Anual) de 298,469.78 miles de dólares/año, con una carga energética de 3.95×10^9 kW/año y un costo de 2.91 dólares/kg de bioetanol.

Figura 3

Proceso de conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol.



Se ha propuesto la implementación de tecnologías intensificadas en los procesos de conversión de biomasa a bioetanol, destacándose entre las técnicas aplicadas las membranas para biorreactores híbridos, ultrasonidos y microondas. De acuerdo con Kumakiri *et al.* (2021), el uso de levaduras termotolerantes y tecnologías basadas en membranas ha demostrado mejorar notablemente el rendimiento del proceso de conversión de bioetanol. Por otro lado, estudios como el de Suresh *et al.* (2020) compararon la hidrólisis ácida asistida por ultrasonido con la hidrólisis enzimática en la producción de bioetanol a partir de residuos de papa. En ambos procesos, se observó una mejora en el rendimiento del bioetanol, siendo la hidrólisis ácida asistida por ultrasonidos más eficiente que la hidrólisis enzimática.

Intermediarios en el proceso de conversión de bioetanol

Durante el pretratamiento y la hidrólisis, la hemicelulosa y la celulosa se convierten en azúcares fermentables como la glucosa y la xilosa. Posteriormente, durante la fermentación, se generan componentes inhibidores, como se muestra en la Figura 4. El tipo y la cantidad de estos componentes dependen en gran medida de la materia prima y del método de pretratamiento (Jönsson y Martín, 2016). La concentración de algunos componentes puede aumentar en las etapas de conversión, mientras que otros pueden ser descompuestos por la levadura en otros productos (Conde-Mejía *et al.*, 2013), los cuales son considerados de alto valor económico, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 4

Rutas de conversión de biomasa.

Adaptado de Espinoza-Vázquez *et al.* (2023b).

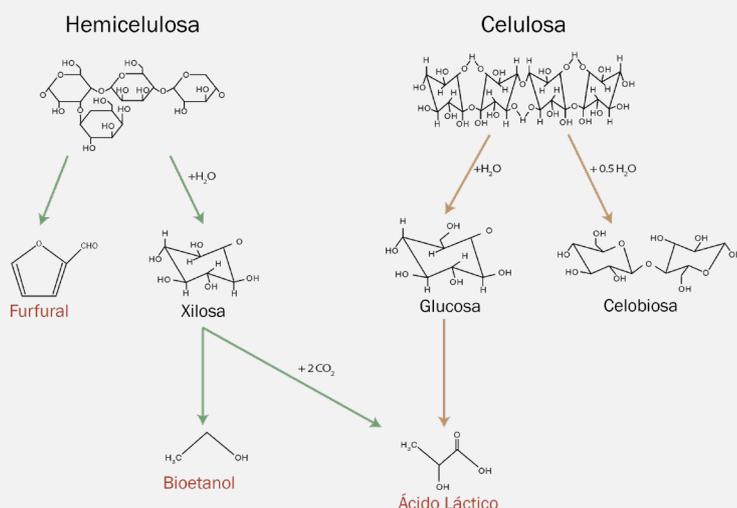
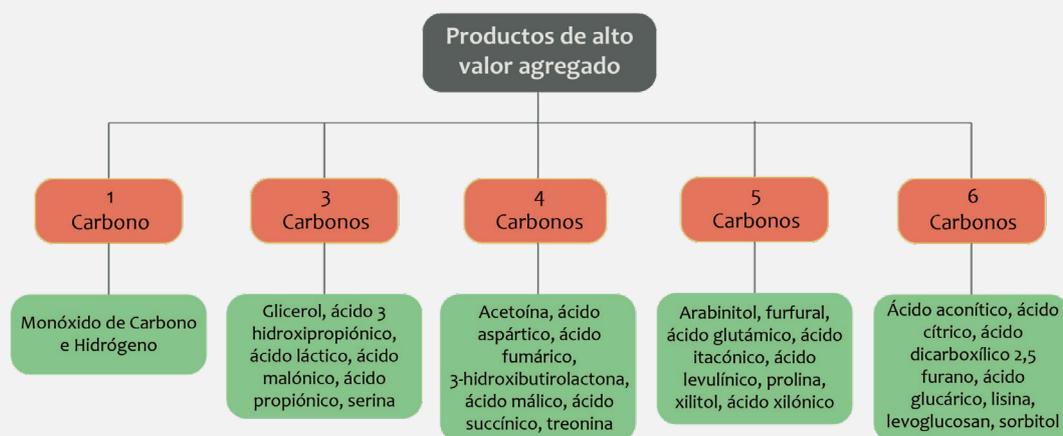


Figura 5

Top 30 productos de alto valor agregado.

(Departamento de Energía, 2004).

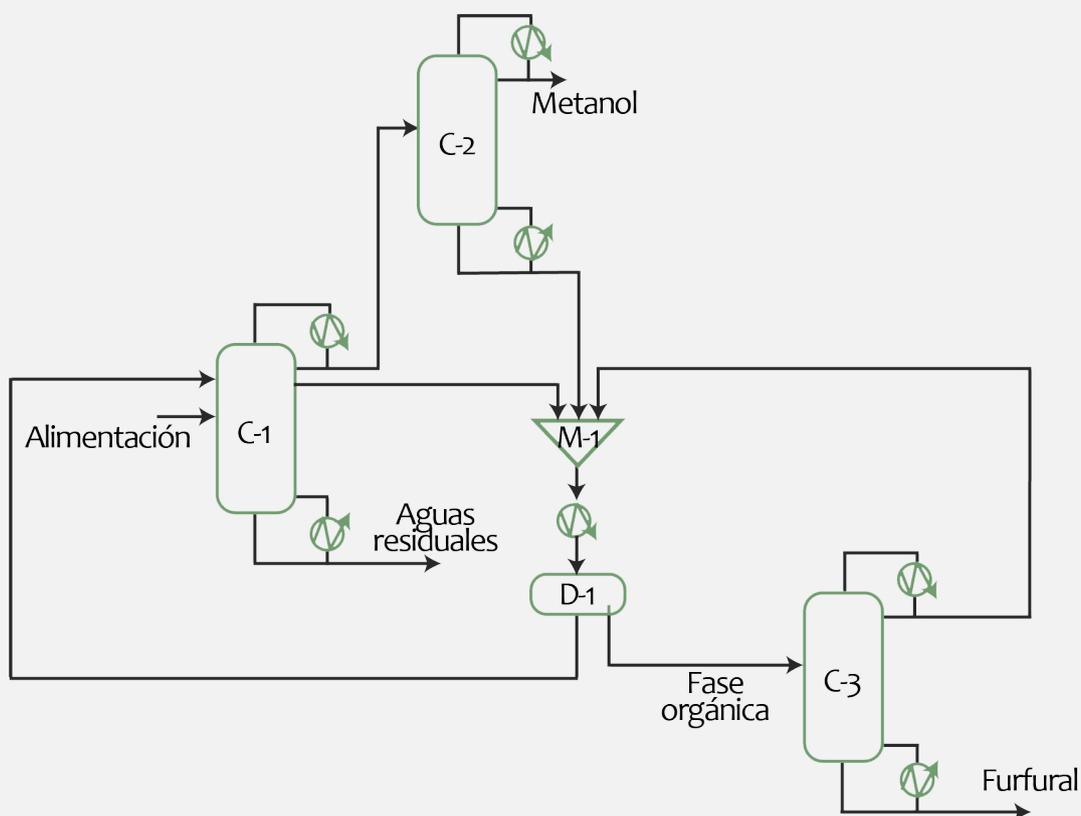


Uno de los productos de alto valor obtenidos es el furfural, el cual se utiliza comúnmente como disolvente y es soluble en etanol, éter y, en pequeñas cantidades, en agua. Por otra parte, el ácido láctico es un importante producto industrial, que se usa como precursor de componentes de pequeñas o grandes moléculas, como el glicol de propileno y polímeros de acrílicos, respectivamente. En el esquema de procesamiento mostrado en la Figura 3, por cada kilogramo de residuos de sorgo se obtienen aproximadamente 0.1 kg de furfural y 0.38 kg de ácido láctico. Estos productos intermediarios pueden someterse a un proceso de purificación para aprovecharlos y así tener la co-producción de bioetanol y bioproductos de manera simultánea.

En la actualidad, el proceso de purificación para el furfural más utilizado es la metodología de la compañía Quaker Oats, cuyo proceso se muestra en la Figura 6. Como se mencionó previamente, el proceso de conversión de biomasa a bioetanol y bioproductos conlleva una gran cantidad de agua. Debido a la formación de un azeótropo entre el agua y el furfural a bajas concentraciones, se requiere una destilación azeotrópica. Para ello, se utiliza la columna C-1 en la cual el agua arrastra al furfural a la fase gaseosa. Esta mezcla pasa a la columna C-2, donde el furfural se condensa y se forman dos fases que se envían a un decantador. La corriente rica en agua se devuelve a la columna C-1 y, en el fondo de esta misma, se eliminan otros componentes pesados. La corriente rica en furfural, sale del decantador y entra en la columna C-3, donde el furfural se purifica. Este esquema se conoce como el proceso Quaker (Dashtban *et al.*, 2012; Rachamontree *et al.*, 2020).

Figura 6

Proceso convencional de separación.
Quaker Oats (Dashtban *et al.*, 2012).



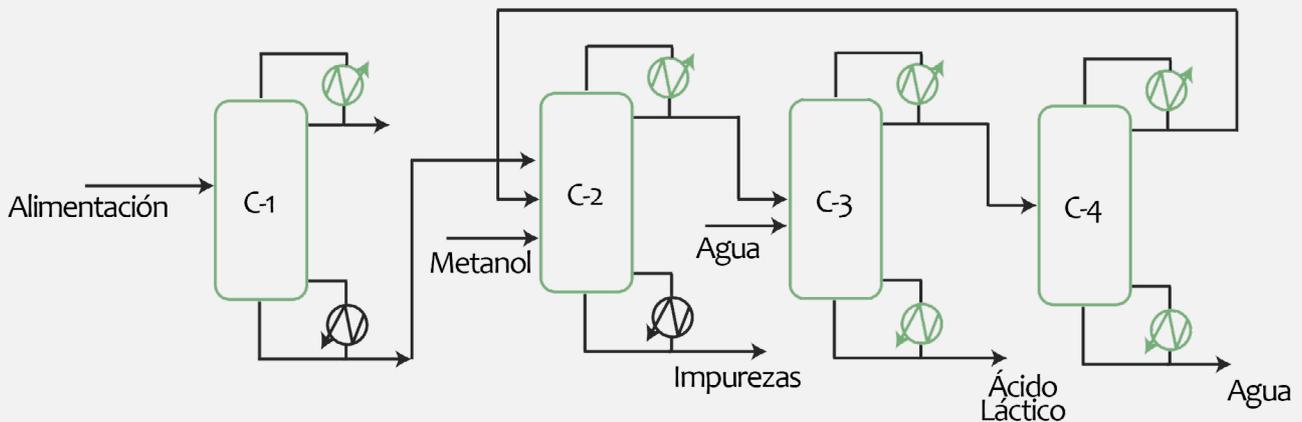
Por otra parte, para la purificación del ácido láctico se suele utilizar un esquema convencional (Kim *et al.*, 2017), representado en la Figura 7. En la primera columna, C-1, se alimenta el flujo procedente del proceso de fermentación que contiene ácido láctico, impurezas y una mayor proporción en agua; el objetivo de esta columna es eliminar la mayor cantidad posible de agua. Posteriormente, el flujo de fondo se alimenta a la columna C-2, donde se lleva a cabo una reacción de esterificación del ácido láctico con metanol, eliminando las impurezas más pesadas en la parte inferior de la columna. Después, el destilado (ácido láctico esterificado) se dirige a la columna C-3, donde se realiza una hidrólisis para obtener ácido láctico purificado, y finalmente, en la columna C-4 se purifica el metanol para ser recirculado en la columna C-2.

En los últimos años, la mayoría de los avances referentes en procesos químicos se han enfocado en la intensificación de procesos, ya que los métodos tradicionales requieren múltiples equipos, lo que resulta en altos costos, uso de espacio considerable en las instalaciones, mayores demandas energéticas, entre otras desventajas. La intensificación de procesos implica

la aplicación de principios innovadores en el diseño de procesos y equipos, ofreciendo beneficios significativos en eficiencia de proceso, cadenas de suministro, reducción de costos de capital, minimización de residuos, entre otros aspectos positivos (Dimían *et al.*, 2014).

Figura 7

Proceso convencional de separación de ácido láctico.



Entre las técnicas utilizadas para ambos procesos destacan las columnas térmicamente acopladas (TCC, por sus siglas en inglés) y las columnas con pared divisoria (DWC, por sus siglas en inglés). El principal objetivo de las TCC es eliminar un condensador o rehervidor del esquema convencional, reemplazándolo con flujos interconectados para reducir el remezclado de componentes volátiles intermedios, lo cual está asociado con ineficiencias termodinámicas en las columnas de destilación (Nhien *et al.*, 2016). Por otro lado, las DWC combinan dos columnas en una mediante una pared que se extiende hasta el fondo de la columna para obtener dos corrientes de fondo distintas (Conteras-Zarazúa *et al.*, 2018).

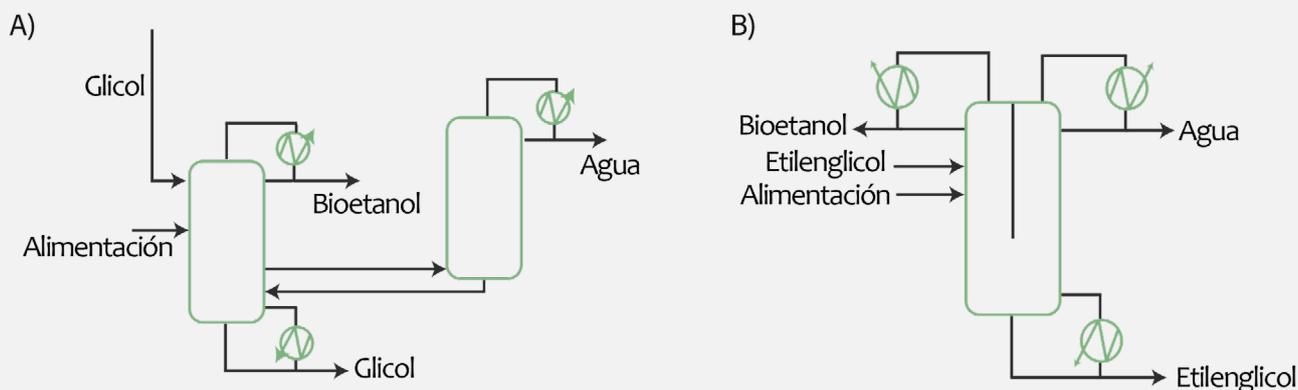
Para el caso de bioetanol, se ha propuesto el uso de las TCC, tal como muestra la Figura 8.A (Torres-Ortega *et al.*, 2009), donde una corriente de etanol diluido en agua es alimentada a una columna de destilación térmicamente acoplada a un rectificador lateral con glicol como agente extractante. Esto ha permitido una reducción de 10 kW en comparación con los esquemas extractivos convencionales. Asimismo, las DWC se han aplicado en la purificación de bioetanol, tal como muestra la Figura 8.B (Loy *et al.* 2012), con secciones superiores divididas y una sección de fondo común. Con una alimentación de agua-etanol concentrada, se separa el etanol en un lado y el

etilenglicol en el fondo, logrando un ahorro energético de hasta 10% respecto a los esquemas convencionales.

Figura 8

Esquemas intensificados de purificación de bioetanol:

A) TCC, B) DWC.



Otro estudio importante es el uso de destilación reactiva y destilación reactiva asistida por membrana, cuya aplicación fue realizada por Kumakiri *et al.* (2021), el cual se centró en una mezcla etanol/agua con un 10% en peso de etanol, con el objetivo de obtener etanol al 99.5 % en peso. El uso de membranas ayudó a deshidratar el etanol, reduciendo así los requerimientos energéticos del proceso. Los procesos intensificados de destilación y separación por membranas son prometedores y pueden reducir los costos energéticos y operativos de la separación del bioetanol (Gómez-Castro *et al.*, 2023).

Análisis económico y ambiental de la producción de furfural y ácido láctico

Existen diversos métodos para la purificación de furfural y ácido láctico, por lo cual, resulta crucial seleccionar el proceso óptimo no sólo desde una perspectiva económica, sino también ambiental. El Costo Anual Total (CAT) y el eco-indicador 99 (ECO-99) son dos métricas clave para evaluar los impactos económicos y ambientales. El CAT comprende la suma de los costos de equipos y operaciones, esto incluye servicios como vapor y electricidad (Turton *et al.*, 2008). Por otro lado, el ECO-99 es una metodología del análisis del ciclo de vida utilizada para evaluar la sostenibilidad de un proceso químico (Dreyer *et al.*, 2003). En el ECO-99, las 11 categorías de impacto se agrupan en tres categorías principales: la salud humana, calidad de los ecosistemas y agotamiento de los recursos.

Para el caso del furfural, según el estudio realizado por Contreras-Zarazúa *et al.* (2022), se muestra una comparación entre

los tipos de procesos y su análisis económico y ambiental. En la Tabla 2 se observa que el proceso convencional tiene un mayor CAT en comparación con los esquemas intensificados, aunque la reducción ambiental no es significativa. La columna térmicamente acoplada es la que muestra un mejor compromiso en términos de costo e impacto ambiental.

Tabla 2

Comparación del CAT y ECO-99 para furfural y ácido láctico.

(Contreras-Zarazúa *et al.*, 2022; González-Navarrete *et al.*, 2021).

| Producto | Proceso | CAT (\$ USD/ año) | ECO-99 (puntos/año) |
|---------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Furfural | Convencional | 2.454×10 ⁷ | 1.544×10 ⁷ |
| | TCC | 1.956×10 ⁷ | 1.478×10 ⁷ |
| | DWC | 2.106×10 ⁷ | 1.492×10 ⁷ |
| | Convencional | 1.274×10 ⁶ | 405 025 |
| Ácido Láctico | TCC | 1.134×10 ⁶ | 376 834 |
| | DWC | 1.062×10 ⁶ | 303 062 |

En cuanto a la producción de ácido láctico, los principales resultados del estudio de González-Navarrete *et al.* (2021) se presentan en la Tabla 2. Se observa un comportamiento similar entre los esquemas convencionales e intensificados, sin embargo, el esquema con pared divisoria exhibe un mejor compromiso tanto en términos de costo como de impacto ambiental para este producto.

Después de analizar el TAC y el ECO-99 para la producción de estos bioproductos, es crucial mantener el enfoque en el objetivo principal de este análisis: incorporar estos procesos al esquema general de producción de bioetanol. Es fundamental aprovechar los productos formados como intermediarios, por ejemplo, del proceso mostrado en la Figura 3, integrando los esquemas mencionados previamente para la recuperación y purificación del furfural y ácido láctico presentes en la corriente “H₁ Out”. La integración de la intensificación de procesos puede mejorar significativamente la rentabilidad económica y ambiental del esquema de biorrefinería. Es esencial también considerar el tamaño del mercado para ambos bioproductos: para el furfural se reporta un precio de venta de 3.15-3.5 \$ USD/kg (Made in China, 2023), con expectativas de crecimiento para el 2028. Mientras tanto, el ácido láctico tiene un precio

de venta de 2.5 \$ USD/kg, y el mercado global se estima en 1,628 billones de dólares (QuimiNet, 2023).

Resumen y perspectivas

La sustitución parcial de la gasolina por bioetanol se presenta como una medida efectiva en ascenso, pero su producción y distribución se ven limitadas por la rentabilidad comparada con los combustibles fósiles. Por ende, es crucial integrar los procesos analizados en el esquema completo de producción de bioetanol para un análisis detallado en una biorrefinería. Además, establecer diseños de cadenas de suministro efectivas es clave, pues la viabilidad del esquema de biomasa depende tanto de la eficiencia del proceso como de la adecuación de la cadena de producción y distribución. Es imperativo desarrollar esquemas integrales de aprovechamiento de biomasa que maximicen la producción de derivados y mantengan la viabilidad económica a través la selección adecuada de rutas de conversión, implementación de tecnologías avanzadas y estrategias de cadena de suministro óptimas en términos económicos, ambientales y sociales.

Conclusiones

En este estudio se han revisado y analizado diversas propuestas para el procesamiento y purificación de bioetanol, así como de bioproductos de alto valor agregado como el furfural y el ácido láctico. En términos generales, se concluye que los procesos intensificados para la purificación de los co-productos derivados en la conversión de biomasa a bioetanol pueden facilitar la creación de esquemas de biorrefinería técnicamente sólidos y económicamente viables. Específicamente, se encontró que los esquemas enfocados en columnas térmicamente acopladas para la purificación de furfural pueden reducir el costo de capital del proceso en un 20 % y su impacto ambiental en un 4 %. En el caso del ácido láctico, las columnas con pared divisoria mostraron ser la opción más favorable, disminuyendo el costo de capital en un 16 %. En resumen, la integración de procesos de purificación de co-productos en la cadena de conversión de biomasa a bioetanol puede jugar un papel crucial en el desarrollo de biorrefinerías sostenibles.

Referencias

Bandyopadhyay-Ghosh, S., Ghosh, S. B., y Sain, M. (2015). The use of biobased nanofibres in composites. En *Biofiber rein-*

- forcements in composite materials*, 571–647. <https://doi.org/10.1533/9781782421276.5.571>
- Claassen, P., Van Lier, J., López Contreras, A., Van Niel, E., Sijtsma, L., Stams, A., De Vries, S., y Weusthuis, R. (1999). Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52, 741–755. <https://doi.org/10.1007/s002530051586>
- Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A., y M. El-Halwagi., M. (2013). Assessment of combinations between pretreatment and conversion configurations for bioethanol production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(8), 956–965. <https://doi.org/10.1021/sc4000384>
- Conde-Mejía, C., Jiménez-Gutiérrez, A., y El-Halwagi, M. (2012). A comparison of pretreatment methods for bioethanol production from lignocellulosic materials. *Process Safety and Environmental Protection*, 90, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.004>
- Contreras-Zarazúa, G., Martín-Martín, M., Sánchez-Ramírez, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2022). Furfural production from agricultural residues using different intensified separation and pretreatment alternatives. Economic and environmental assessment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108569>
- Contreras-Zarazúa, G., Sánchez-Ramírez, E., Vázquez-Castillo, J. A., Ponce-Ortega, J. M., Errico, M., Kiss, A. A., y Segovia-Hernández, J. G. (2018). Inherently safer design and optimization of intensified separation processes for furfural production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(15), 6105–6120. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03646>
- Damián-Huato, M. A., Cruz-León, A., Ramírez-Valverde, B., Romero-Arenas, O., Moreno-Limón, S., y Reyes-Muro, L. (2013). Maíz, alimentación y productividad: modelo tecnológico para productores de temporal de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(2), 157–176. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v10n2/v10n2a2.pdf>
- Dashtban, M., Gilbert, A., y Fatehi, P. (2012). Production of furfural: overview and challenges. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 2(4), 44–53.
- Departamento de Energía (10 de noviembre del 2023). *Biofuel basic*. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biofuel-basics>
- Dimían, A. C., Bildea, C. S., y Kiss, A. A. (2014). Process intensification. *Computer Aided Chemical Engineering*, 35, 397–448. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62700-1.00010-3>
- Dreyer, L. C., Niemann, A. L., y Hauschild, M. Z. (2003). Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99: Does it matter which one you choose? *The International Journal*

- of *Life Cycle Assessment*, 8(4), 191–200. <https://doi.org/10.1007/BFo2978471>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F. I., Sánchez-Ramírez, E., y Romero-Izquierdo, A. G. (2023a). Development and assessment of intensification alternatives on the lignocellulosic bioethanol production process. *Computer Aided Chemical Engineering*, 52, 2735–2740. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50435-2>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Hernández-Camacho, N. V., y Gómez-Castro, F. I. (2023b). Agricultural Residues as Raw Materials for a Bio-based Industry. En *Sustainable Agricultural Practices and Product Design* (pp. 77–99). American Chemical Society.
- Garrote, G., Dominguez, H y Parajó, J. (1999). Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(3), 191–202.
- Gómez-Castro, F. I., Segovia-Hernández, J. G., Rodríguez, R. M., & Mejía, C. C. (2023). Advances and challenges in the production and purification of bioethanol using intensified processes. En *Bioethanol Fuel Production Processes*. II, 426–436.
- González-Navarrete, C., Sánchez-Ramírez, E., Ramírez-Márquez, C., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., y Segovia-Hernández, J. G. (2021). Innovative reactive distillation process for the sustainable purification of lactic acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(1), 621–637. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04050>
- Hahn-Hägerdal, B., Karkumaa, K., Fonseca, C., Spencer-Martins, I., y Gorwa-Grauslund, M. F. (2007). Towards industrial pentose-fermenting yeast strains. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 74, 937–953. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0827-2>
- Hong, B., Xue, G., Weng, L., y Guo, X. (2012). Pretreatment of moso bamboo with dilute phosphoric acid. *BioResources*, 7(4), 4902–4913. <https://doaj.org/article/3075a807a4c3478591d3227b003c-fegb>
- Jönsson, L. J. y Martín, C. (2016). Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresource Technology*, 199, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009>
- Kim, S. Y., Kim, D. M., y Lee, B. (2017). Process simulation for the recovery of lactic acid using thermally coupled distillation columns to mitigate the remixing effect. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 34, 1310–1318. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0009-1>
- Kooijman, H. A. y Sorensen, E. (2022). Recent advances and future perspectives on more sustainable and energy efficient distillation processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 188(11), 473–482 <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.005>

- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., y Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(8), 3713–3729. <https://doi.org/10.1021/ie801542g>
- Kumakiri, I., Yokota, M., Tanaka, R., Shimada, Y., Kiatkittipong, W., Lim, J. W., Murata, M. y Yamada, M. (2021). Process intensification in bio-ethanol production—Recent developments in membrane separation. *Processes*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/pr9061028>
- Law Corner (10 de noviembre del 2023). *Stubble burning – A trouble to the environment*. <https://lawcorner.in/stubble-burning-a-trouble-to-the-environment/>
- Loy, Y., Lee, X., y Rangaiah, G. (2015). Bioethanol recovery and purification using extractive dividing-wall column and pressure swing adsorption: An economic comparison after heat integration and optimization. *Separation and Purification Technology*, 149, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.06.007>
- Lutze, P., Babi, D. K., Woodley, J. M., & Gani, R. (2013). Phenomena based methodology for process synthesis incorporating process intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(22), 7127–7144. <https://doi.org/10.1021/ie302513y>
- Made in China (2023). *Furfural Price*. https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Furfural_Price.html
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., y Pant, K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Nhien, L. C., Long, N. V. D., Kim, S., y Lee, M. (2016). Design and assessment of hybrid purification processes through a systematic solvent screening for the production of levulinic acid from lignocellulosic biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(18), 5180–5189. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04519>
- O’Connell, D., Batten, D., O’Connor, M., May, B., Raison, J., Keating, B., Beer, T., Braid, A., Haritos, V., Begley, C., Poole, M., Poulton, P., Graham, S., Dunlop, M., Grant, T., Campbell, P. y Lamb, D. (2007). *Biofuels in Australia - Issues and Prospects: A Report for the Rural Industries Research and Development Corporation*. Rural Industries Research and Development Corporation.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (10 de noviembre del 2023). *Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Al-Hinai, A., Muhtaseb, A. H., y Ronney, D. W. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(6), 4075–4118. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>

- QuimiNet (2023). *Lactic Acid Price*. https://www.quiminet.com/principal/resultados_busqueda.php?N=Lactic+acid&d=P
- Rachamontree, P., Douzou, T., Cheenkachorn, K., Sriariyanun, M., y Rattanaporn, K. (2020). Furfural: A sustainable platform chemical and fuel. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(1), 3–10. <https://pho2.tci-thaijo.org/index.php/ijast/article/view/239991>
- Reboredo, F. H., Lidon, F. C., Ramalho, J. C., y Pessoa, M. F. (2017). The forgotten implications of low oil prices on biofuels. *Bioproducts and Biorefining*, 11(4), 625–632. <https://doi.org/10.1002/bbb.1769>
- Ritchie, H., Roser, M., y Rosado, P. (2022). *Energy, Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>
- Saini, J. K., Saini, R., y Tewari, L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech*, 5, 337–353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>
- Segovia-Hernández, J. G., Vázquez-Ojeda, M., Gómez-Castro, F., Ramírez-Márquez, C., Errico, M., Tronci, S., y Rong, B.G. (2014). Process control analysis for intensified bioethanol separation systems. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 75, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.11.002>
- Senatore, A., Dalena, F., y Basile, A. (2020). Novel bioethanol production processes and purification technology using membranes. En *Studies in Surface Science and Catalysis* (pp. 359–384). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00019-7>
- Shah, A. A., Seehar, T. H., Sharma, K., y Toor, S. S. (2022). Biomass pretreatment technologies. *Hydrocarbon Biorefinery*, 203–228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823306-1.00014-5>
- Shrotri, A., Kobayashi, H., y Fukuoka, A. (2017). Catalytic conversion of structural carbohydrates and lignin to chemicals. *Advances in Catalysis*, 60, 59–123. <https://doi.org/10.1016/bs.acat.2017.09.002>
- Suresh, T., Sivarajasekar, N., Balasubramani, K., Ahamad, T., Alam, M., y Naushad, M. (2020). Process intensification and comparison of bioethanol production from food industry waste (potatoes) by ultrasonic assisted acid hydrolysis and enzymatic hydrolysis: Statistical modelling and optimization. *Biomass and Bioenergy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105752>
- Talebna, F., Karakashev, D., y Angelidaki, I. (2010). Production of bioethanol from wheat straw: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 101(13), 4744–4753. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.080>
- Tan, L., Tang, Y.-Q., Nishimura, H., Takei, S., Morimura, S., y Kida, K. (2013). Efficient production of bioethanol from corn stover by pretreatment with a combination of sulfuric acid and sodium hydroxide.

Preparative Biochemistry and Biotechnology, 43(7), 682–695.
<https://doi.org/10.1080/10826068.2013.773338>

- Torres-Ortega, C. E., Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Hernández, H., Bonilla-Petriciolet, A., y Maya-Yescas, R. (2009). Design and optimization of thermally coupled distillation sequences for purification of bioethanol. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27(1), 957–962. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70380-3](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70380-3)
- Tse, T. J., Wiens, D. J., Shen, J., Beattie, A. D., y Reaney, M. J. (2021). *Saccharomyces cerevisiae* fermentation of 28 barley and 12 oat cultivars. *Fermentation*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/fermentation7020059>
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A. y Bhattacharyya, D. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.
- Wingren, A., Galbe, M., y Zacchi, G. (2003). Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: Comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks. *Biotechnology Progress*, 19(4), 1109–1117. <https://doi.org/10.1021/bp034018o>