

**Evaluación cienciométrica y factibilidad económica sobre la producción de biobutanol
mediante fermentación ABE a partir de melaza de caña panelera**

Adriana María Rueda Sierra

**Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Ciencias y Tecnologías
Ambientales**

Director

Javier Ricardo Gómez Cardozo

Ingeniero Químico, PhD

Co-directora

Martha Cervantes Díaz

Química, M.Sc

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

2024

Agradecimientos

A Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, mi motor y motivación para terminar mis estudios posgraduales.

A mis padres Néstor Rueda Celis (Q.E.P.D), Alba Teresa Sierra de Rueda que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte emocional, espiritual y económica para poder llegar a ser una profesional.

A mis hermanos Néstor Julián e Isabel Cristina quienes por sus palabras de aliento y amor me dieron fuerzas para alcanzar este logro.

A mi esposo Dorian Caraballo y a mi hija, Helen Sofia por ser parte motivadora e inspiradora en mi vida.

A mis directores, los Prof. Javier Ricardo Gómez y Martha Cervantes Díaz, por su guía constante, y por impulsarme a dar lo mejor en cada paso de esta tesis.

Contenido

Introducción	11
1. Evaluación cienciométrica y factibilidad económica sobre la producción de biobutanol mediante fermentación ABE a partir de melaza de caña panelera	14
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	17
2. Marco referencial	17
2.1 Marco conceptual.....	17
2.1.1 Descripción general de las propiedades del butanol	17
2.1.2 El butanol en la industria.....	20
2.1.3 Bacterias del género Clostridium	25
2.1.4 Ruta metabólica de la fermentación ABE	25
2.1.5 Sustratos empleados en la producción de biobutanol	27
2.1.6 Obtención, propiedades físico-químicas y usos de la melaza	32
2.1.7 Microorganismos fermentadores de materias primas para la producción de ABE	35
2.1.8 Tipos de fermentación para la producción de n-butanol	37
2.1.9 Mejora en los procesos de obtención de los ABE	38
2.1.10 Instalaciones Industriales para la producción de biobutanol con fermentaciones integradas a procesos de recuperación.....	41
2.2 Vigilancia Tecnológica	43

2.4 Marco legal en Colombia para la producción de biocombustibles	45
3.1 Búsqueda y selección de la literatura.....	47
3.2 Análisis de la literatura	47
4. Resultados.....	48
4.1 Actividad científica de investigaciones relacionadas con la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol	48
4.1.1 Áreas de investigación en la aplicación de la fermentación ABE	49
4.1.2 Publicaciones por año	50
4.1.3. Densidad de publicaciones por países.....	51
4.2 Focos Tecnológicos	52
4.2.1 Lens.org.....	52
5. Conclusiones	53
Referencias.....	55

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Propiedades fisicoquímicas de los combustibles más comunes y algunos sustitutos....</i>	19
Tabla 2. <i>Microorganismos empleados en la fermentación ABE.....</i>	36
Tabla 3. <i>Tipos de reactores utilizados en la producción de biobutanol</i>	37
Tabla 4. <i>Ventajas y consumos energéticos de los diferentes procesos de recuperación de n-butanol</i>	40
Tabla 5. <i>Marco legal nacional sobre biocombustibles en Colombia</i>	45

Lista de figuras

Figura 1. <i>Isómeros del butanol. Estructuras y aplicaciones.....</i>	18
Figura 2. <i>Proceso Oxo para la obtención de 1-butanol por procesos petroquímicos.....</i>	22
Figura 3. <i>Reacción de Síntesis Reppe para la obtención de 1-butanol</i>	22
Figura 4. <i>Reacción de hidrogenación del crotonaldehído para la obtención de 1-butanol.....</i>	23
Figura 5. <i>Reacción general de la síntesis biotecnológica del butanol a partir de azúcares fermentables.</i>	23
Figura 6. <i>Esquema conceptual consolidado del proceso ABE</i>	24
Figura 7. <i>Ruta de formación de productos de fermentación por el grupo del ácido butírico de los clostridios.....</i>	26
Figura 8. <i>Obtención de ABE por procesos fermentativos de biomasa</i>	28
Figura 9. <i>Costo en la producción de biobutanol usando diferentes biomasa.....</i>	31
Figura 10. <i>Melaza como subproducto del procesamiento de la caña panelera</i>	33
Figura 11. <i>Plantas de producción de butanol en el mundo</i>	42
Figura 12. <i>Áreas de investigación más relevantes en el estudio de la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol.....</i>	49
Figura 13. <i>Distribución de publicaciones por año relacionadas con el estudio de la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol, durante el periodo 2000 – 2023.....</i>	50
Figura 14. <i>Densidad de publicaciones por países</i>	52

Resumen

En las últimas décadas, el mundo ha estado enfrentando problemas ambientales y económicos, como el cambio climático global causado, en parte, por el uso excesivo de combustibles fósiles no renovables (es decir, carbón, petróleo y gas natural). Por este motivo, se ha hecho necesario estudiar y desarrollar fuentes de energía alternativas que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El biobutanol se considera actualmente un combustible de nueva generación, dadas sus grandes ventajas frente a otros biocombustibles; uno de ellos es la alta presencia de oxígeno haciendo que su combustión sea más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

En este proyecto se realizó un análisis cienciométrico para identificar tendencias en la producción de biobutanol mediante fermentación ABE bajo un enfoque técnico y económico del proceso, utilizando la base de datos de referencia *Scopus* (Elsevier, B.V., 2022) durante el periodo 2012-2022. Los indicadores cienciométricos y matrices relacionadas obtenidos mediante el programa de minería de texto *VantagePoint* (versión académica 15.0, Search Technology) nos permitieron definir algunas de las variables más importantes del proceso, tales como: relación sustrato-microorganismo, métodos de fermentación ABE y cuantificar los rendimientos en procesos de recuperación de biobutanol.

Palabras clave: biocombustibles, *n*-butanol, ciencimetría, *Clostridium*, fermentación ABE, melaza panelera

Abstract

In recent decades, the world has been facing environmental and economic problems, such as global climate change caused, in part, by the excessive use of non-renewable fossil fuels (i.e., coal, oil and natural gas). For this reason, it has become necessary to study and develop alternative energy sources that help reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Biobutanol is now considered a new generation fuel, given its great advantages over other biofuels; one of them is the high presence of oxygen making its combustion cleaner and more environmentally friendly.

In this project, a scientometric analysis was carried out to identify trends in the production of biobutanol through ABE fermentation under a technical and economic approach to the process, using the Scopus reference database (Elsevier, B.V., 2022) during the period 2012-2022. Scientometric indicators and relational matrices obtained using the VantagePoint text mining program (academic version 15.0, Search Technology) allowed us to define some of the most important variables of the process, such as: substrate-microorganism ratio, ABE fermentation methods and quantify the yields in biobutanol recovery processes.

Keywords: biofuels, n-butanol, Clostridium, ABE fermentation, molasses, scientometry

Glosario

Alcohol: “Son compuestos de formula general R-OH, donde -R es cualquier grupo alquilo” (Morrison y Boyd, 1998a).

Bioeconomía: “La producción basada en el conocimiento y la utilización de recursos, procesos y métodos biológicos para proporcionar bienes y servicios de forma sostenible en todos los sectores económicos” (FAO 2023).

Biocombustible: “Combustible obtenido mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o de residuos orgánicos” (Gurunathan, et al., 2021).

Butanol: “Alcohol con cuatro átomos de carbono en su cadena carbonada que puede ser usado como biocombustible, disolvente o sustrato para la industria química. Se obtiene a través de procesos químicos o de la degradación fermentativa de materiales orgánicos, tales como: cultivos energéticos, residuos agrícolas o desechos forestales” (Morrison y Boyd, 1998b).

Clostridium: “Bacilos Grampositivos, anaerobios obligados y formadores de esporas. Representan uno de los géneros bacterianos más grandes. Este grupo contiene organismos con propiedades metabólicas que tienen un enorme potencial para los procesos biotecnológicos. Un organismo modelo es *Clostridium acetobutylicum* que se ha utilizado y aún se utiliza en la producción industrial a gran escala de los disolventes acetona y butanol” (Dürre, 2014).

Descarbonización: “Proceso de reducir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero de diversas actividades humanas” (Mulvaney, 2020).

Fermentación ABE: “La fermentación ABE es un proceso bifásico que convierte los azúcares en ácidos (acetato, butirato) y otros compuestos oxigenados (acetona, butanol, etanol” (Buehler y Mesbah, 2016).

Melaza: “Líquido más o menos viscoso, de color pardo oscuro y sabor muy dulce, que queda como residuo de la fabricación del azúcar de caña o remolacha” (RAE 2019a).

Microorganismo: “Organismo unicelular solo visible al microscopio” (RAE 2019b).

Sostenibilidad: “Manejo y explotación de los recursos naturales sin generación de desigualdades ni conflictos”. La sostenibilidad es la acción que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social. La noción de sostenibilidad parte de la constatación del hecho de que el crecimiento económico puede estar generando problemas en el medio físico que limitan las posibilidades futuras de crecimiento y desarrollo (Tellez, 2022).

Sustrato: “Compuesto carbonado que sufre un tipo particular de reacción (Morrison y Boyd, 1998c)”.

Introducción

Uno de los productos colombianos más tradicionales después del café, es la panela, un alimento de elevado nivel endulzante y valor nutricional, que ha hecho parte de la cultura y tradición por años. De acuerdo con las cifras de Fedepanela (Fondo de Fomento de la Panela), para el año 2020 el país tuvo una producción total de 1.071.944 ton de panela, con un promedio de rendimiento por hectárea, de 6,5 ton/ha. Santander, Cundinamarca, Antioquia y Boyacá son los principales productores, con cerca del 56,45% del total del país. Sin embargo, Colombia es el primer consumidor *per/cápita*, por lo que este sector representa un eslabón importante en la economía agropecuaria colombiana (Minagricultura, 2021).

La melaza es un subproducto del procesamiento de la caña, que, aunque no se considera tóxico, puede contaminar los acuíferos al oxidarse en el agua, generando abundante espuma y reduciendo a cero la demanda de oxígeno a causa de la acumulación de gases producto de su degradación microbiana (Jiménez et ál., 2020).

Una de las alternativas para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales es la conversión de estos, en productos de mayor valor agregado, mediante procesos biotecnológicos, como técnicas de fermentación ABE (acetona-butanol-etanol), los cuales emplean microorganismos nativos o modificados genéticamente para la obtención de compuestos de interés industrial como el biobutanol (Lúcia García, 2018); este, es un importante sustrato en la química fina y un potencial biocombustible con capacidad para compensar el agotamiento de los carburantes líquidos de origen fósil (Pugazhendhi et al., 2019).

Los microorganismos más estudiados para la producción de este compuesto son las bacterias del género *Clostridium*, las cuales son capaces de metabolizar una gran variedad de

sustratos como monosacáridos (*i.e.* pentosas y hexosas) y polisacáridos (almidón) (Noriega Medrano, 2017).

Los clostridios representan uno de los géneros bacterianos más numerosos, son formadores de esporas, Grampositivas, anaerobias y fermentadoras por excelencia. Este grupo contiene organismos con propiedades metabólicas que tienen un enorme potencial para los procesos biotecnológicos como por ejemplo el organismo modelo *Clostridium acetobutylicum*, que se ha utilizado y se sigue utilizando en la producción industrial a gran escala de los disolventes acetona y butanol, y que, dependiendo del sustrato, la vía metabólica y la cepa, determina el rendimiento de la fermentación (Aguado, 2020).

Desde el punto de vista técnico, se puede considerar que la producción de biobutanol, a partir de melaza panelera, es una forma sostenible para obtener combustibles. La melaza es un derivado de la producción de panela, por lo que su uso como materia prima para la obtención de butanol disminuye la cantidad de residuos y la contaminación asociada con su disposición final. Además, el butanol es un combustible que presenta ventajas ambientales significativas frente a los combustibles fósiles, ya que su combustión produce menos emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos.

Se puede considerar que el aprovechamiento de la melaza, sustrato sostenible y renovable, para la producción del butanol puede generar ingresos y empleos en la región, por la alta demanda mundial de artículos fabricados con materiales biológicos, que aumenta según aumentan las preocupaciones ambientales y las restricciones de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Una de las herramientas más eficientes para identificar los temas de investigación más relevantes y actuales en desarrollo, son las técnicas cienciométricas. En este documento se describen los resultados de los análisis de la literatura para la obtención del biobutanol a través de

fermentación ABE, con melaza panelera como sustrato, como por ejemplo los diferentes procesos industriales de fermentación (por lotes, continua discontinua) y métodos de recuperación del producto, permitiendo así, la identificación de limitaciones, tendencias y brechas en este tema. La información consignada en este documento puede fortalecer los procesos académicos, de investigación y empresariales de la región.

1. Evaluación cuantitativa y factibilidad económica sobre la producción de biobutanol mediante fermentación ABE a partir de melaza de caña panelera

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente, el planeta se está enfrentando a crecientes problemas ambientales causados por las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes, en parte, de la quema de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel. Los desarrollos científicos y tecnológicos ya están ayudando a reducir las emisiones haciendo que la tecnología actual funcione de manera más eficaz. Para lograr el objetivo de emisiones cero es importante proponer alternativas de aprovechamiento de todos los recursos disponibles y la utilización de los subproductos de los procesos industriales para generar biocombustibles y productos para la química fina, uno de ellos es el butanol (Gates, 2021).

El mercado mundial del butanol en 2022 fue de 6853 millones de dólares y se prevé que alcance los 10286 millones para el año 2032. El mercado del butanol está experimentando un notable crecimiento, impulsado por diversas aplicaciones industriales, como disolvente versátil, intermedio químico y biocombustible. El butanol encuentra un amplio uso en la fabricación de revestimientos, resinas y plásticos. Este alcohol se utiliza como sustrato para la producción industrial de diversos ésteres, como el acrilato de butilo y el acetato de butilo, éteres de glicol, disolventes directos, plastificantes, entre otros. Estos productos son empleados en diversas industrias, incluyendo la construcción de edificios, pinturas y recubrimientos, marina, farmacéutica, química, y productos de cuidado personal, entre otras (Liu et al., 2022; Razack et al, 2023).

Ante este aumento de la demanda, los fabricantes están optimizando los procesos de producción y explorando métodos de abastecimiento sostenibles para satisfacer las demandas de las aplicaciones industriales y como biocombustibles, y uno de estos procesos, es la producción del *n*-butanol a partir de subproductos ricos en azúcares fermentables de la producción de panela.

Por su alto contenido de azúcares y sales, la melaza panelera es tradicionalmente empleada como suplemento en la alimentación del ganado bovino, caprino y ovino (Lagos-Burbano y Castro-Rincón, 2019). Aunque se han venido formulado alternativas de valorización de la melaza panelera en procesos de fermentación, para la fabricación de compuestos de alto valor agregado como son los biocombustibles (Fajardo y Sarmiento, 2007), una producción económicamente viable del biobutanol estará determinada principalmente por el costo de la materia prima, el tipo de microorganismo empleado, el proceso de fermentación y recuperación del producto final.

Por lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el tipo de microorganismo, proceso de fermentación y recuperación ABE existente que permite obtener el mayor rendimiento de producción de butanol a costos más bajos?

1.2 Justificación

Una tendencia notable en el mercado del butanol es el creciente enfoque en la sostenibilidad. Los productores están respondiendo a la creciente demanda de alternativas ecológicas, desarrollando este alcohol a partir de fuentes renovables o empleando métodos de producción innovadores con impacto ambiental reducido.

La adopción de soluciones sostenibles para la obtención de productos industriales se refleja en el compromiso de la Agenda para la Bioeconomía 2030 liderada por el Departamento Nacional de Planeación CONPES 3934 (CONPES, 2018), donde a partir del aprovechamiento de

componentes de la biomasa y la biodiversidad ricos en carbohidratos como son las melazas, se pueden obtener productos biobasados como combustibles y energía. Bajo este contexto el butanol obtenido a partir de subproductos paneleros se considera una alternativa ambientalmente sostenible para la preparación de productos bioenergéticos e industriales.

De acuerdo con Fedepanela para el año 2020 el país alcanzó un total de 206.785 ha de área cultivada de caña panelera y una producción total de 1.071.944 ton de panela, al entender que Colombia posee grandes reservas de melaza de caña, se justifica realizar estudios que caractericen desde un punto de vista ambiental el desempeño de pretratamientos químicos existentes al tratar melaza de caña colombiana, lo cual representaría para el país un reto y una contribución a la investigación y a la industria energética.

Desde un punto de vista académico el análisis cienciométrico evalúa el estado del arte de un área específica, estableciendo tendencias de investigación y redes científicas, entre otros. De esta forma con la adecuada combinación de palabras claves es posible identificar condiciones de operación de los equipos usados en la fermentación ABE, procesos de recuperación, rendimientos y factibilidad económica, lo que permitirá contribuir a la identificación de la oportunidad que tiene el país en la producción de *n*-butanol.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Establecer las tendencias de investigación e innovación en la producción de *n*-butanol a través de la fermentación ABE a partir de melaza panelera como sustrato, mediante un enfoque

que incluya tanto la evaluación de la producción de biobutanol como la evaluación económica del proceso, mediante la aplicación de herramientas cientiométricas.

1.3.2 Objetivos específicos

Estudiar la relación entre sustrato, microorganismos y procesos de recuperación de *n*-butanol en la fermentación ABE a partir de melaza de caña panelera como fuente de materia prima, mediante un análisis cientiométrico de artículos científicos (Scopus, Elsevier B.V., 2023) y patentes (Metabuscador académico de Lens versión 8.7.1.).

Identificar las tendencias tecnológicas mediante Lens.org para la evaluación del desarrollo de las innovaciones aplicadas en la obtención de productos de alto valor agregado derivados de la melaza.

Realizar una evaluación económica del proceso de producción de biobutanol a partir de melaza panelera, considerando los costos de materia prima, energía, equipos y mercados potenciales.

2. Marco referencial

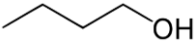
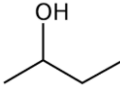
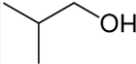
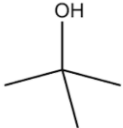
2.1 Marco conceptual

2.1.1 Descripción general de las propiedades del butanol

El 1-butanol o alcohol *n*-butílico tiene fórmula condensada C_4H_9OH , y un peso molecular de 74.12 g/mol. Existen cuatro isómeros, dependiendo de la ramificación de la cadena carbonada,

tal como se puede apreciar en la *Figura 1* Estas estructuras definen a su vez diferentes propiedades químicas que permiten diversos usos o aplicaciones industriales (Ferreruela, 2016).

Figura 1. *Isómeros del butanol. Estructuras y aplicaciones*

Compuesto	Estructura Molecular	Aplicaciones
1-butanol (<i>n</i> -butanol)		– Disolvente (pintura) – Plastificantes – Frenos hidráulicos – Productos cosméticos
2-butanol (<i>sec</i> -butanol)		– Disolvente – Limpiador industrial – Removedor de pintura
2-metil-1-propanol (<i>iso</i> -butanol)		– Disolvente y aditivo – Limpiador industrial – Ingrediente de tintas
2-metilpropan-2-ol (<i>ter</i> -butanol)		– Disolvente, limpia industrial y removedor pintura – Intermedio para MTB ETBE**, TBHP***

*Nota:**MTBE: metil tert-butil éter. **ETBE: etil-tert butil éter. ***TBHP: tert-butil hidroperóxido. Adaptado de (Trindade y Santos, 2017)

Aunque el *n*-butanol se produce desde 1916, principalmente como materia prima para disolventes. Hoy en día, tras décadas de estancamiento, se están popularizando nuevas aplicaciones, como potenciador de combustible y materia prima básica para la industria química. En comparación con el metanol y el etanol, el *n*-butanol es un alcohol más complejo que ofrece varias ventajas: mayor poder calorífico, menor volatilidad, menos problemas de ignición, mayor viscosidad y seguridad en su distribución. Además, el *n*-butanol puede mezclarse con gasolina en cualquier proporción y, como combustible, ayuda a reducir las emisiones de NO_x y la formación de hollín en los gases de escape (Kujawska et al., 2015).

Dentro del grupo de isómeros, el *n*-butanol es el isómero más aceptado como ingrediente activo en productos de consumo y en la producción de acrilatos de butilo, acetatos de butilo y éteres de glicol, usados en recubrimientos, barnices, pinturas, ceras, cauchos y plastificantes. (Trindade y Santos, 2017). El *n*-butanol actúa sinérgicamente con el acetato de butilo como un sistema de disolventes para las lacas de nitrocelulosa y ofrece un sistema que promueve la solvatación de los solutos de forma más efectiva que cualquiera de los disolventes individuales.

En la industria manufacturera, el *n*-butanol se usa en plásticos, polímeros, lubricantes, líquidos de frenos y caucho sintético. En la industria farmacéutica se emplea como disolvente para la extracción de fármacos, antibióticos, hormonas y vitaminas; también ha aumentado su uso en la industria de alimentos y bebidas como saborizante artificial de alimentos (Transparency Market Research, 2018).

En la *Tabla 1* se presentan las propiedades del butanol, el etanol y los carburantes comunes. El *n*-butanol en comparación con el etanol es indudablemente superior como combustible o aditivo por la similitud en sus propiedades, que están relacionadas principalmente por la mayor proporción de carbonos en la cadena y la menor solubilidad en agua; esto lo hace más compatible con la gasolina (Xue et al., 2017).

Tabla 1. *Propiedades fisicoquímicas de los combustibles más comunes y algunos sustitutos*

	Gasolina	Diesel	Metanol	Etanol	Butanol
Fórmula Molecular	C ₈ H ₁₈	C ₁₀ H ₂₀	CH ₄ O	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH
Peso Molecular	111,19	198,4	32,04	46,06	74,11
Densidad Energía (MJ/L)	32	35,86	16	19,6	29,2
Número octano	80-99	20-30	111	108	96
T autoignición (°C)	300	210	470	434	385
Poder calorífico (MJ/kg)	42,7	42,5	19,9	26,8	33,1

	Gasolina	Diesel	Metanol	Etanol	Butanol
Pto Ebullición (°C)	30-200	180-360	65	78.3	117,6
Calor Vaporización (KJ/kg)	0,36	2,1	1,2	0,92	0,43
Viscosidad (mm ² /s) a 40°C	0,4-0,8	1,9-4,1	0,59	1,08	2,63
Aire-combustible	14,7	14,3	6,49	9,02	11,21

Adaptado de (Kolesinska et al., 2019)

Entre las ventajas del butanol como carburante con respecto al etanol es que alcanza un 95% de producción de energía que el mismo volumen de gasolina, mientras que el etanol no pasa del 75% (Jacobo et al., 2011). De otro lado, tolera mejor la contaminación por agua y es menos corrosivo que el etanol, por lo que se puede mezclar directamente con la gasolina (Hui et al., 2017). A diferencia de otros alcoholes, el *n*-butanol se puede utilizar como sustituto total de la gasolina sin ningún tipo de modificaciones en los motores de los automóviles (Ndaba et al., 2015).

2.1.2 El butanol en la industria

El proceso de síntesis del *n*-butanol en la industria se da principalmente por procesos petroquímicos, donde el propileno y el gas de síntesis reaccionan juntos en presencia de un catalizador. El propileno es un petroquímico que se puede producir a partir de gases residuales de unidades de craqueo catalítico fluido en refinerías, así como del craqueo con vapor de materias primas líquidas como nafta y GLP. Al tratarse de una materia prima procedente de combustibles fósiles, el precio del propileno fluctúa frecuentemente dependiendo del estado del mercado (Yadav

et al., 2014). El gas de síntesis se produce a partir de una base de hidrocarburos, que también experimenta volatilidad de precios.

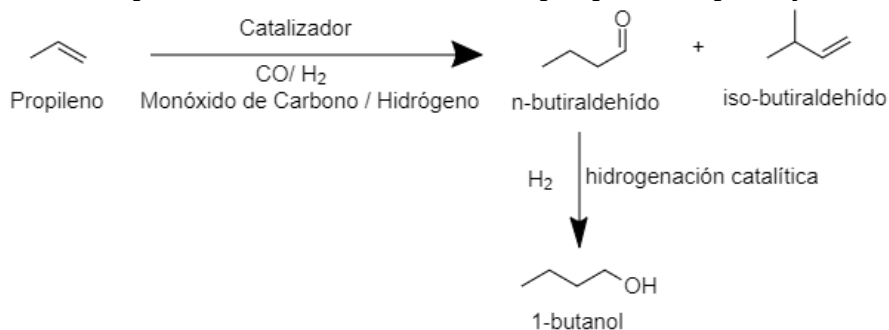
El Consejo Mundial de la Energía afirma que sólo hay un número finito de recursos de hidrocarburos y que podrían escasear en los próximos 25 a 50 años. Estos recursos se están agotando cada vez más por el uso pesado industrial, residencial y de transporte. Entre las principales empresas productoras se encuentran: Eastman Chemical Company, Corporación Química Mitsubishi, Dow, SABIC, Galaxy Chemicals, KH Chemicals, Solvents, KH Neochem Co., Ltd., OQ Chemicals GmbH y Petrochina (Exactitude Consultancy, 2024)

La volatilidad del precio de las materias primas podría impedir la expansión del mercado del butanol, pero como resultado de esta incertidumbre, se ha dado impulso a la sustitución del n-butanol proveniente de combustibles fósiles por el de origen biológico, reduciendo así la dependencia de recursos no-renovables. Para producir biobutanol se pueden utilizar diversas materias primas de biomasa, como residuos agrícolas, cultivos energéticos y residuos sólidos municipales. Esta variedad de opciones de materias primas promueve la flexibilidad regional y reduce la dependencia de las materias primas. Al utilizar biomasa sobrante o cultivos energéticos especiales, también presenta oportunidades potenciales para la industria agrícola. El butanol de origen biológico se puede utilizar como sustituto directo de la infraestructura y las aplicaciones actuales o combinarse con n-butanol normal. Esta compatibilidad minimiza la necesidad de realizar ajustes o inversiones sustanciales en maquinaria y procesos (Cruz, 2021).

A continuación, se describirán brevemente las síntesis industriales y biotecnológicas para la obtención del n-butanol.

2.1.2.1 Síntesis industriales del butanol. En la industria el butanol se produce por tres procesos diferentes: la oxo-síntesis, la síntesis de Reppe y la hidrogenación de crotonaldehído. En el proceso Oxo - (proceso petroquímico) se lleva a cabo la reacción del propileno con monóxido de carbono e hidrógeno en presencia de catalizadores de Cobalto (Co), Rodio (Rh) o Rutenio (Ru), produciendo una mezcla de n-butiraldehído e iso-butiraldehído los cuales por hidrogenación catalítica generan n-butanol e iso-butanol *Figura 2*.

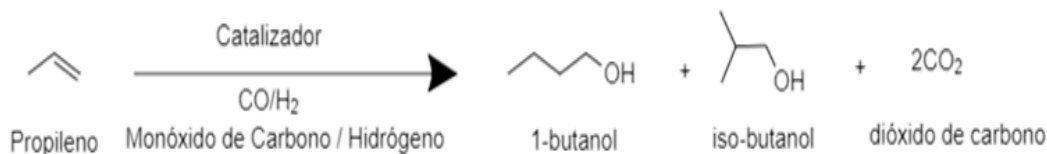
Figura 2. Proceso Oxo para la obtención de 1-butanol por procesos petroquímicos



Adaptado (Infante, 2016).

En la síntesis de Reppe el propileno reacciona con monóxido de carbono y agua en condiciones de presión de 0.5 - 2x10⁶ Pa y temperatura a 100°C en presencia de catalizadores. El n-butanol y iso-butanol se forman directamente en una proporción 86:14. Este proceso no ha sido comercialmente exitoso, por el alto costo de los catalizadores (*Figura 3*).

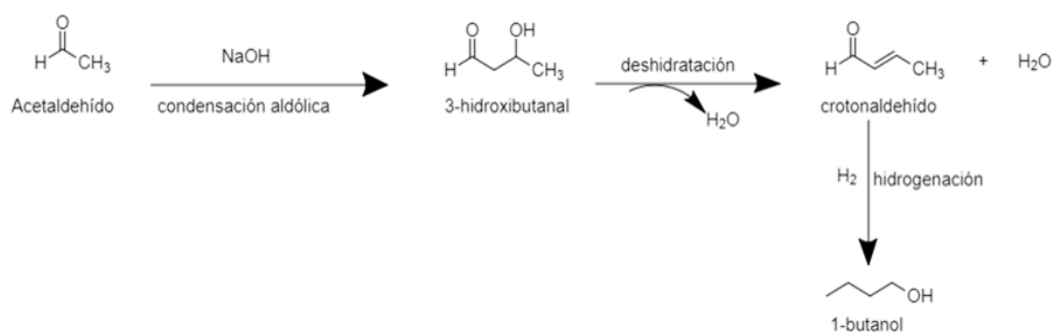
Figura 3. Reacción de Síntesis Reppe para la obtención de 1-butanol



Adaptado de (Infante, 2016).

El tercer proceso industrial es la hidrogenación del crotonaldehído (3-hidroxibutanol). Hasta hace unas décadas, la ruta más común para la síntesis de butanol fue la de la condensación aldólica del acetaldehído para producir el 3-hidroxibutanol, que por deshidratación e hidrogenación con un catalizador de Cobre (Cu) produce el n-butanol (*Figura 4*). Con este proceso se ha reportado la obtención de 1000 kg de n-butanol a partir de 1350 kg de acetaldehído (Moscoso R., 2016).

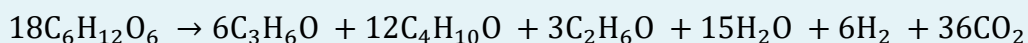
Figura 4. Reacción de hidrogenación del crotonaldehído para la obtención de 1-butanol



Adaptado de (Infante, 2016)

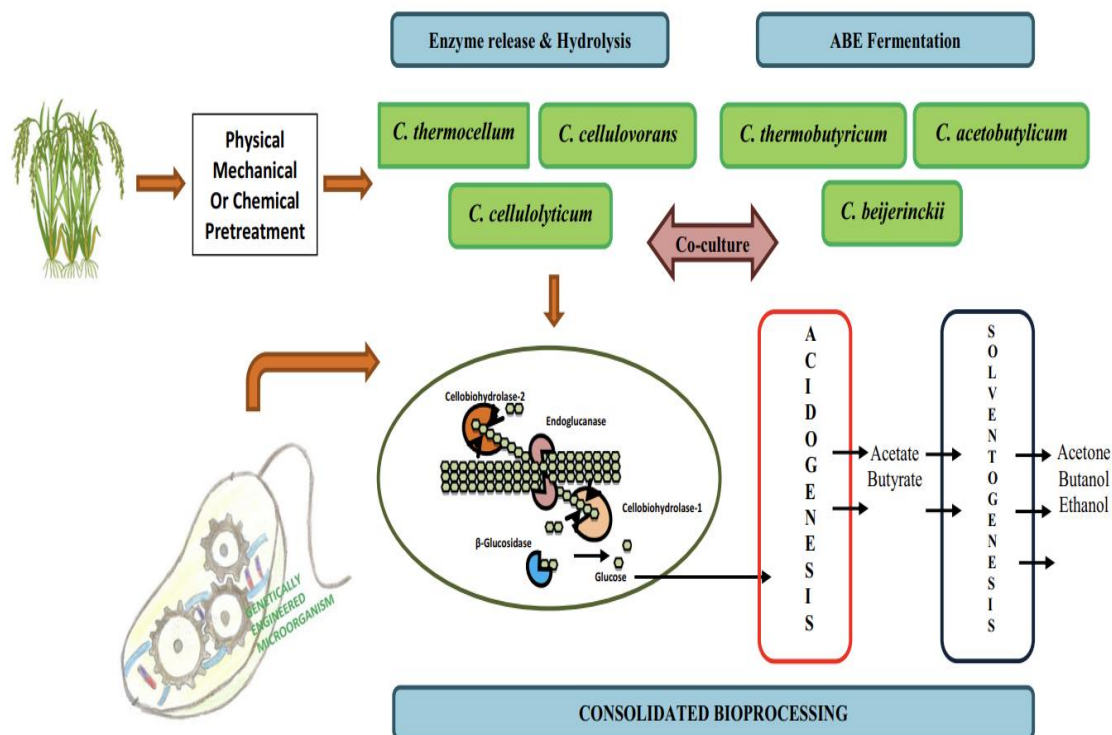
2.1.2.2 Síntesis biotecnológica del butanol. Otra vía de producción de *n*-butanol se da a partir de la fermentación de azúcares, conocida como proceso de Weizmann o fermentación ABE (acetona, butanol, etanol). Este proceso se lleva a cabo a una temperatura de 37°C y una atmósfera de presión; en esta, el microorganismo fermentativo se encarga de consumir la glucosa y producir acetona, etanol, butanol, agua, hidrógeno y dióxido de carbono, tal y como se muestra en la *Figura 5*. (Trindade y Santos, 2017).

Figura 5. Reacción general de la síntesis biotecnológica del butanol a partir de azúcares fermentables.



En la fermentación ABE se produce una proporción de 3:6:1 partes de acetona, butanol y etanol, respectivamente. Los azúcares fermentables se obtienen a través de cualquiera de los pretratamientos físicos y químicos óptimos y la hidrólisis enzimática (*Figura 6*). Posteriormente, los azúcares fermentables son utilizados por varios clostridios solventogénicos para realizar la fermentación ABE en biorreactores, junto con la paja de arroz, otras materias primas como paja de trigo, paja de cebada, rastrojo de maíz, mazorca de maíz, salvado de arroz, pasto varilla, entre otros (Vivek, 2019).

Figura 6. Esquema conceptual consolidado del proceso ABE



Adaptado de Vivek, 2019.

El proceso de acidogénesis produce en una primera etapa el acetato y el butirato, que por reacciones reductivas de solvento-génesis producen los productos deseados, acetona, butanol y

etanol. Este proceso de biosíntesis emplea sustratos ricos en azúcares, los cuales son transformados por microorganismos generalmente pertenecientes al género *Clostridium spp.*

2.1.3 Bacterias del género *Clostridium*

Los clostridios obtienen la energía solamente por fosforilación del sustrato y son fermentadores. Diversos clostridios fermenten los azúcares para producir ácido butírico como producto final; otras también producen acetona y butanol; algunos representantes de este grupo son capaces de fijar nitrógeno, siendo el *C. pasteurianum* uno de los mayores responsables de todo el nitrógeno fijado en la anaerobiosis en el suelo. Un grupo de clostridios fermenta la celulosa con la formación concomitante de ácidos y alcoholes; se piensa que estos organismos son los principales implicados en la degradación de la celulosa.

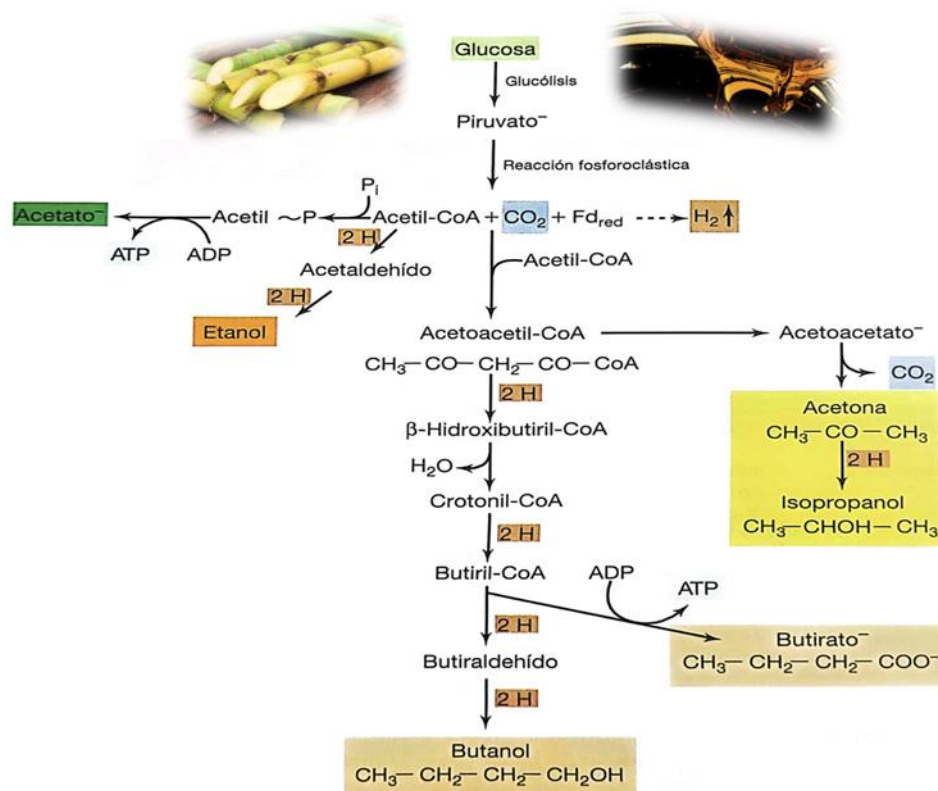
Este tipo de bacterias son estrictamente anaeróbicas y Grampositivas, secretoras de enzimas capaces de descomponer los polisacáridos en azúcares fermentables -monosacáridos, que posteriormente se metabolizan a través de la glucólisis o la ruta de pentosas fosfato (Bharathiraja et al., 2017). Sin embargo, los obstáculos que se enfrentan en la producción de *n*-butanol por esta vía son los altos costos de producción, el consumo de tiempo y la etapa de esporulación. Ante estos problemas se han propuesto alternativas en la metodología de preparación, en los diseños de los reactores y el uso de microbios modificados genéticamente, entre otras posibles soluciones.

2.1.4 Ruta metabólica de la fermentación ABE

Cuando ya se tiene la materia prima hidrolizada, se procede a la fermentación bacteriana; en ella se obtienen tres tipos productos: disolventes ABE, ácidos orgánicos, acetato y butirato, y

gases como el dióxido de carbono e hidrógeno (Zheng et al., 2015; García et al., 2011; Ndaba et al., 2015). La ruta metabólica de la fermentación ABE se muestra en la *Figura 7*.

Figura 7. Ruta de formación de productos de fermentación por el grupo del ácido butírico de los clostridios



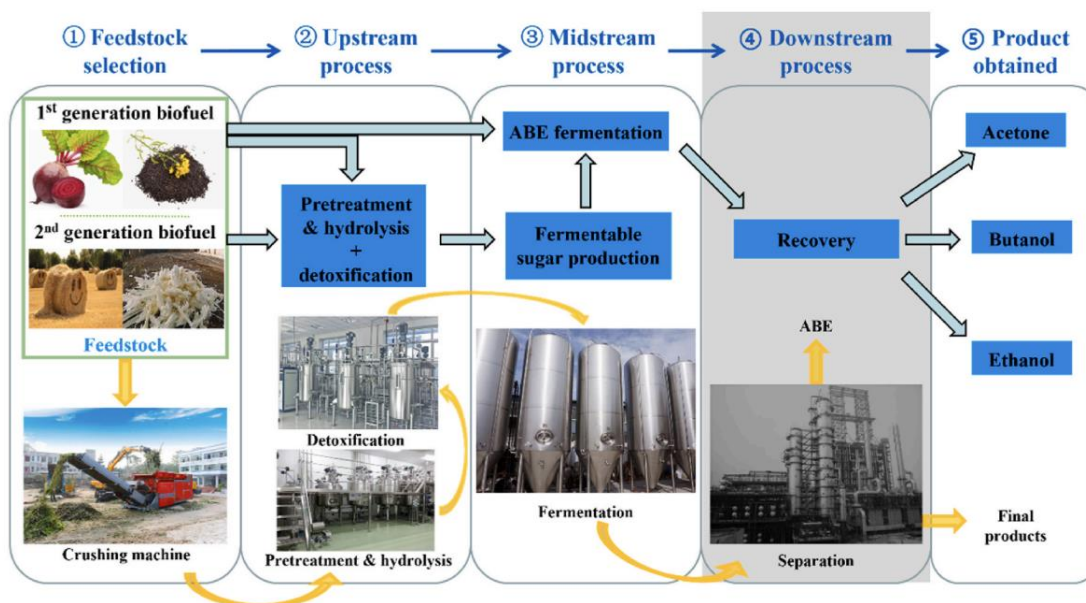
Adaptado de Madigan et al., 2004.

En la primera etapa, en condiciones anaerobias, el *C. acetobutylicum* hidroliza los carbohidratos complejos en azúcares simples, y realiza la fermentación. Posteriormente, a través de la ruta de Embden-Meyerhof la glucosa convierte en piruvato; este se rompe en acetil-CoA e hidrógeno. El acetil-CoA se reduce a productos de fermentación utilizando el NADH derivado de la ruta glucolítica. La proporción de los diferentes productos está influenciada por la duración y las condiciones de las fermentaciones (Madigan et al., 2004)

En las etapas iniciales, los productos predominantes son los ácidos acético y butírico, pero a medida que disminuye el pH de la fermentación, cesa la síntesis de los ácidos y comienza la fase de solventogénesis, produciéndose acetona y butanol, que son neutros. Sin embargo, si el pH se mantiene en la zona neutra con ayuda del CaCO_3 , se produce muy poco de los productos neutros, constituyendo entonces tres cuartas partes el butírico y una parte el ácido acético. Esto tiene sentido fisiológico, porque al contrario de la formación de productos neutros, la producción de ácidos permite la síntesis adicional de ATP.

2.1.5 Sustratos empleados en la producción de biobutanol

El biobutanol se puede obtener a partir de materia prima que en su estructura contenga azúcares o carbohidratos complejos, cultivos ricos en almidón, sustancias abundantes en hemicelulosa y celulosa, y lignina; inclusive aquellos que, por acción enzimática puedan convertirse en metabolitos del glicólisis tal como el glicerol (Geng et al., 2024). En la *Figura 8* se muestra el proceso general para obtener ABE por procesos fermentativos: selección de la materia prima, pretratamientos, fermentación, purificación y cuantificaciones de productos finales.

Figura 8. Obtención de ABE por procesos fermentativos de biomasa

Adaptado de Geng et al., 2024.

Dependiendo de la naturaleza de la biomasa utilizada, la producción de butanol puede clasificarse en tres generaciones:

El butanol de primera generación se da con el uso de sustratos amiláceos, maíz, trigo, la paja de arroz, la yuca, entre otros; y sustratos azucarados como la caña de azúcar, la remolacha, la melaza, entre otros (Ahorsu et al., 2018). En 2013 se reportaron los resultados de la fermentación de la melaza de caña por la cepa *C. saccharobutylicum* DSM13864, y por un proceso continuo de cuatro etapas, los investigadores lograron una productividad de 0,439 g/L·h, y una concentración de butanol de 8,26 g/L (Ni et al., 2013).

Producción de butanol de segunda generación. El uso de biomasa proveniente de cultivos comestibles o alimentarios tiene un impacto no favorecedor en la seguridad alimentaria y la biodiversidad. A raíz de ello, la producción de biobutanol de primera generación ha ido disminuyendo y se han realizado estudios sobre biomásas que minimicen estos impactos, como p.e. desechos agrícolas, microalgas, tallos, cascaras, paja, hojas, etc (Evans y Nagele, 2018). Una

de las ventajas de este tipo de biomasa es que no implica uso de tierras fértiles ni cuidados especiales (Liu et al., 2022). Por un proceso de sacarificación y fermentación simultaneas (SSF), empleando paja de arroz con mezcla de enzimas comerciales Cellic® CTec2 se obtuvo una productividad de butanol de 0,344 g/L·h (Valles et al., 2021).

Empleando la cepa *C. acetobutylicum* NRRL B-591 y como materias primas desechos lignocelulósicos y la fracción de materia orgánica de los desechos sólidos urbanos, se estudió la fermentación ABE (Farmanbodar et al., 2020). Previo a la fermentación, se realizó un pretratamiento con ácido diluido para romper la estructura de la lignocelulosa recalcitrante, hidrolizar la hemicelulosa e hidrolizar/solubilizar el almidón, lo que condujo a un sólido pretratado, y un hidrolizado rico en azúcares fermentables. Partiendo de 500 g de residuos de jardín y 323 g de residuos de sólidos se obtuvieron 11,2 g de acetona, 3,4 g de etanol y 22,9 g de butanol.

Empleando el bagazo de sorgo dulce, con 92 % glucano y 62 % de xilano y la cepa *C. acetobutylicum* 1202, se realizó una fermentación ABE de la cual obtuvieron 17,3 g de butanol/kg de materia prima (Su et al., 2020).

Debido a los inconvenientes de los altos costos del pretratamiento químico y la hidrólisis enzimática para convertir estructuras de la celulosa y la hemicelulosa en los azúcares monómeros (Poe, 2019), se ha hecho imprescindible la búsqueda de fuentes alternativas con alta capacidad de producción de biobutanol. Gran interés ha despertado el uso de microalgas; ellas pueden cultivarse de manera relativamente sencilla en biorreactores y tienen el potencial para generar compuestos que pueden reemplazar los combustibles fósiles (Ge et al., 2022).

Biobutanol de tercera generación. Las microalgas se pueden utilizar en la industria farmacéutica, cosmética, alimentaria y de biocombustibles. Son energía renovable de tercera generación y tienen instalaciones diferenciables en comparación con las fuentes de energía

renovables anteriores. Además, no tienen conflicto con las muestras derivadas de plantas por los terrenos utilizados para el cultivo. Pueden cultivarse rápidamente y consisten en inmensas masas que multiplican sus núcleos celulares en menos de 24 h y pueden cultivarse cien veces más rápido que las plantas con núcleos reales (Onay, 2020).

El proceso de fotosíntesis es el paso crucial que convierte el sol en energía química. Esta energía conduce a la acumulación de biomasa y compuestos metabólicos como lípidos y carbohidratos para los organismos fotosintéticos. La cantidad y la calidad de la luz provocan cambios en las microalgas. La biomasa de microalgas puede disminuir con mucha más luz y el contenido de biocombustible puede cambiar. En realidad, este es un mecanismo de defensa para las microalgas. Pueden aumentar el contenido de carbohidratos y lípidos cuando aparecen estos entornos hostiles. En un estudio realizado por Onay se emplearon las microalgas *Nannochloropsis gaditana* para la producción de biobutanol por fermentación ABE, generándose $2,9 \pm 0,24$ g/L a partir de una concentración inicial de azúcares de 20 g/L (Onay, 2020).

En otra investigación se comparó la idoneidad de dos tipos de algas para usarse en la fermentación ABE; las algas extraídas con líquido iónico (ILEA) y las extraídas con hexano (HEA), los títulos más altos de butanol (8,05 g/L) se obtuvieron en la fermentación con los hidrolizados ácidos HEA, pero en este caso se necesitó una detoxificación tras la hidrólisis ácida para apoyar la formación del producto (Gao et al., 2016).

Una de las mayores ventajas del uso de microalgas en la producción de biobutanol de tercera generación, es que llega a mitigar las emisiones de CO₂, y convertir el CO₂ en biomasa rica en carbohidratos que puede ser usada como materia prima en la fermentación ABE.

En los procesos de transesterificación de las grasas para generar diésels, el principal subproducto es el glicerol. Este es un recurso valioso y abundante, que tiene un menor costo debido

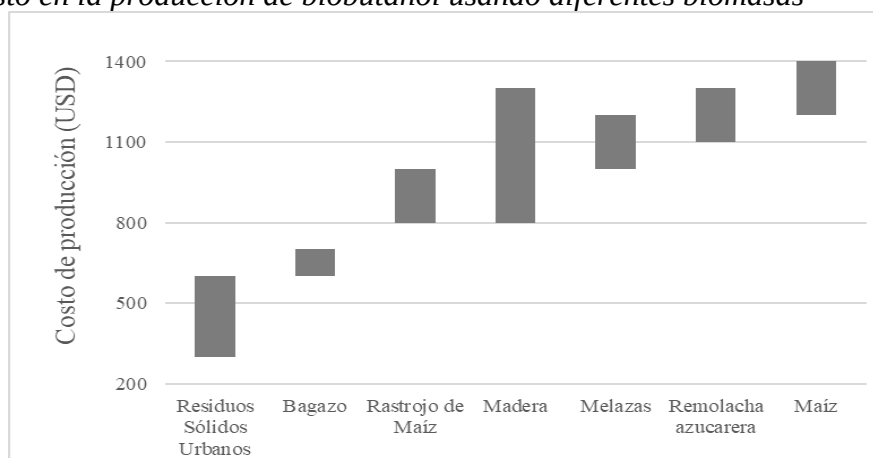
a que es un producto desecho del proceso de producción. La producción de biobutanol a partir de glicerol se ha mostrado viable económicamente. Malaviya et al. usaron la bacteria mutante *C. pasteurianum* MBEL_GLY2, hiperproductora de butanol, que fue capaz de producir 10,8 g/L de butanol a partir de 80 g/L de glicerol (Malaviya et al., 2012).

2.1.5 Valor de las materias primas para la producción de ABE

La producción de biobutanol depende en gran medida del valor de la materia prima utilizada para el propósito (Liu et al., 2022). Normalmente, para la síntesis de butanol se requieren procesos de pretratamiento, hidrólisis, fermentación y recuperación del producto. El costo de fabricación de biobutanol a partir de diferentes fuentes, como maíz, remolacha azucarera, melaza, madera, rastrojo de maíz, bagazo y residuos sólidos urbanos se muestran en la *Figura 9*.

El margen del maíz en la producción de biobutanol parece menos atractivo debido al mayor costo involucrado en la selección de la materia prima, y mucho mayor si se usan los residuos sólidos urbanos. Las melazas se encuentran en un costo medio con respecto a las anteriores.

Figura 9. Costo en la producción de biobutanol usando diferentes biomásas



Adaptado (Liu et al., 2022).

El uso de residuos sólidos urbanos (RSU) para la conversión en combustibles útiles se hace cada vez más viable a la hora de pensar en reducción de costos. En un estudio de Huang et al., 2020 se emplearon 81 g/L de residuos alimentarios para producir 18,9 g/L de caldo de fermentación ABE con un rendimiento de 0,38 g/g. En otro estudio, los residuos orgánicos domésticos se secaron al 85% de humedad; el análisis mostró que este material contenía 25,1 g de glucosa, 8,4 g de xilosa y 5,8 g de otros monosacáridos por cada 100 g de materia prima; empleando el *C. acetobutylicum* DSM 1731 para la fermentación, se obtuvo 1,5 g/L de biobutanol (Claassen et al., 2000).

2.1.6 Obtención, propiedades físico-químicas y usos de la melaza

En Colombia, la caña panelera o azucarera (*Saccharum officinarum*), es el cultivo más importante en productividad agrícola después del café; el 55% del total del área cultivada se dedica a la elaboración de panela y el 45% a la obtención de azúcar y etanol (Murcia-Pardo, 2016).

De acuerdo con las cifras de Fedepanela, para el año 2020 el país alcanzó un total de 206 mil ha sembradas, un área cosechada de alrededor de 171 mil ha, un promedio de rendimiento de 6,5 ton/ha de panela y una producción total de unos 107 millones de ton de panela, siendo los principales productores Santander, Cundinamarca, Antioquia y Boyacá con cerca del 56,45% de la producción del país (SIPA - Fedepanela, 2021; MINAGRICULTURA, 2021; Mathier et al., 2013). La melaza es el residuo de cristalización del azúcar, del que no se puede obtener más azúcar por métodos físicos. Se elabora mediante la cocción del jugo de la caña de azúcar hasta la evaporación parcial del agua que éste contiene, formándose un producto meloso semi-cristalizado. Corresponde a la parte líquida de lo que se conoce como “masas cocidas de baja pureza”. El componente sólido, son cristales de azúcar y, la separación de unos y otros se lleva al cabo en las “centrífugas”, mediante la aplicación física de fuerzas del mismo nombre. Después de la

centrifugación, la melaza se presenta como un fluido viscoso, de color café muy oscuro con un sabor entre amargo y dulce, y un olor particular, que se caracteriza por ser rico en azúcares invertidos (Morawa 2024). Son precisamente, estos azúcares lo que hace a la melaza materia prima para la fermentación ABE (*Figura 10*).

Figura 10. *Melaza como subproducto del procesamiento de la caña panelera*



Adaptado de Morawa 2024.

El sabor es dulce, agradable, según los expertos, cuanto más oscura sea, más sabor y nutrientes tendrá. A la melaza se le denomina miel 85°Brix. La denominación Brix es usada para indicar la gravedad específica, esta indica el porcentaje de azúcares por peso.

No obstante, la melaza contiene también ciertos minerales, gomas y otros materiales extraños, por lo que las lecturas en Brix no son un indicador verdadero del total de azúcar o sólidos totales. La melaza contiene de 75 a 83% de materia seca, 30 a 40% de sacarosa, 2,5 a 4,5% de compuestos nitrogenados (predominando aspartato y glutamato) y aproximadamente, 0,4 a 1,5% de nitrógeno. Entre los azúcares, del 26 a 40% es sacarosa y de 12 a 25% de azúcares reductores. El contenido de proteína cruda normalmente es bastante bajo (cerca del 3%); el contenido de ceniza varía de 8-10%, constituido principalmente por K, Mg, Ca, Cl y sales de azufre (Michel, 2009).

Esta composición es precisamente lo que le da a la melaza un gran valor alimenticio como suplemento en la elaboración de piensos para la alimentación de ganado.

La melaza se puede utilizar como componente en la producción de productos de valor añadido como el 5-hidroximetilfurfural, el mortero de cemento y biocombustibles (Zhang et al., 2021).

La rica composición en nutrientes, la convierte en un sustrato valioso para la fermentación microbiana, favoreciendo su actividad y acelerando el proceso de fermentación, del cual se puede llegar a obtener productos de alto valor agregado (Ni et al., 2012).

Dado el bajo coste de mercado de los subproductos de caña de azúcar y sus altas concentraciones de carbono y otros nutrientes, se han desarrollado investigaciones sobre la bioconversión de melazas en productos con mayor valor agregado (Magalhães et al., 2020). A continuación, se describirán algunos ejemplos de obtención de butanol a partir de melazas.

La fermentación ABE de melaza de caña con concentraciones variables de azúcar (50-100 g/L) y lípidos, se realizó empleando el *C. acetobutylicum* y levaduras oleaginosas, (Gao et al., 2022). A partir de 70 g/L de azúcares se produjo un total de 19,6 g/L de los disolventes, de los cuales, 5,58 g/L fueron de acetona, 13,16 g/L de butanol y 0,90 g/L de etanol; el rendimiento fue de 0,34 g/g.

En otro estudio donde se empleó melaza de caña como sustrato y *C. beijerinckii* TISTR 1461 (Narueworanon et al., 2021). La cepa bacteriana se inmovilizó en piezas de tallo de loto para mejorar la eficiencia de producción de butanol y mejorar los procesos de separación; la fermentación anaerobia se realizó con un proceso de lotes en forma discontinua, en botellas de 1 L, con tapón de rosca, a 37°C y con agitación a 150 rpm. Bajo estas condiciones la concentración

de butanol fue de 12,89 g/L, correspondiente a una productividad de butanol de 0,36 g/L·h y un rendimiento de butanol de 0,36 g/g.

2.1.7 Microorganismos fermentadores de materias primas para la producción de ABE

El primer microorganismo utilizado a escala industrial para la fermentación ABE fue la bacteria *Clostridium acetobutylicum*. Estos bacilos son Grampositivos anaeróbicos y formadores de esporas (Kushwaha et al., 2018) que determinan el rendimiento de la fermentación y contribuyen en los procedimientos de pretratamiento de sustratos, la hidrólisis y la recuperación del disolvente (Aguado, 2020). Los microorganismos productores de butanol son *C. acetobutylicum*, *C. beijerinckii*, *C. saccharobutylacetonicum*, aunque estas clases no pueden tolerar concentraciones de butanol más allá de 13-20 g/L (varia de una especie a otra) (García et al., 2011).

Con el objetivo de favorecer la producción de butanol frente a la acetona y etanol, mejorar la tolerancia al oxígeno y a los disolventes generados, se han desarrollado investigaciones metabólicas sobre el género *Clostridium* (Becerra et al., 2015). Se ha reportado la inserción de genes de *Clostridium* en microorganismos no productores ABE, tales como la *Escherichia coli* (Shen et al., 2011), *Pseudomonas putida* (Rühl et al., 2009), *Bacillus subtilis* (Kataoka et al., 2011), *Lactobacillus brevis* (Berezina et al., 2010) y *S.cerevisiae* (Steen et al., 2008), lograndose la producción de butanol con ellas.

Los cultivo tipo de Clostridios, producen concentraciones de butanol menores al 2%, mientras que, otros tipos de microorganismos genéticamente modificados para la fermentacion ABE pueden llegar a producir concentraciones hasta del 3% (Knoshaug y Zhang, 2009). Estos microorganismos producen principalmente n-butanol o iso-butanol (el iso-butanol es menos tóxico

para la célula y es un biocombustible interesante, pero no puede suplir el mercado químico del *n*-butanol. La principal desventaja que tienen estas bacterias no-naturales productoras de butanol, es que no consumen la gran variedad de azúcares que pueden metabolizar los clostridios (Green, 2011). En la *Tabla 2. Microorganismos empleados en la fermentación ABE*.

Tabla 2 se recogen algunos de los microorganismos empleados en la fermentación ABE, el sustrato, los metabolitos producidos, y los rendimientos de butanol.

Tabla 2. *Microorganismos empleados en la fermentación ABE*

Microorganismo	Sustrato	Metabolitos	Butanol g/L	Referencia
Clostridium acetobutylicum	Glucosa	Butanol, acetona, etanol	10,4	Huesemann et al., 2012
Clostridium saccharoperbutyl Acetonicum	Glucosa	Butanol, acetona, etanol	16,2	Thang et al., 2010
Clostridium Beijerinckii	Glucosa	Butanol, isopropanol	15,21	Qureshi et al., 2010
Clostridium Tyrobutyricum	Glucosa	Butanol, etanol	10,0	Yu et al., 2015
Clostridium Pasteurianum	Glicerol	Butanol, 1,3-propanodiol	6,5	Ahn et al., 2011
Escherichia coli	Glucosa	Butanol, propanol	2,0	Shen y Liao, 2008
Saccharomyces cerevisiae	Galactosa	butanol	0,0025	Steen et al., 2008
Bacillus subtilis	Glicerol	Butanol, etanol	0,024	Nielsen et al., 2009
Lactobacillus brevis	Glucosa	Butanol, etanol	0,303	Berezina et al., 2010

Adaptado de (Zheng et al., 2015).

2.1.8 Tipos de fermentación para la producción de n-butanol

La producción de *n*-butanol por fermentación se puede direccionar a través de tres modos de operación los cuales han sido evaluados extensamente: producción por lotes (Cheng et al., 2015), producción por lotes alimentados (Qureshi et al., 2008) y, producción por modo continuo (Sarchami et al., 2016). En cualquiera ruta de operación, lo más complicado es identificar el reactor más adecuado y económico para la producción de biobutanol. En la *Tabla 3* **Tabla 3** se recogen los diferentes procesos de fermentación en la síntesis de biobutanol.

Tabla 3. *Tipos de reactores utilizados en la producción de biobutanol*

Proceso para la producción de biobutanol	Perspectivas	Inconvenientes	Referencia
Fermentación por lotes	Eficiente y control apropiado	El pH descontrolado puede bajar el rendimiento del producto	Al-Shorgani et al., 2018
Fermentación por lotes alimentados	La concentración del sustrato puede ser bajo.	La selectividad es baja comparada con el proceso continuo	Niglio et al., 2019
Proceso continuo	Ahorro de tiempo en la esterilización e inoculación. Buen rendimiento	El costo de recuperación del producto es alto	Al-Shorgani et al., 2019

Adaptado de (Liu et al., 2022)

En una fermentación por lotes con *C. acetobutylicum* JB200 (una especie tolerante al butanol), se utilizaron células inmovilizadas, en un biorreactor de lecho fibroso, durante 16 lotes consecutivos durante 800 h, lográndose un total de 16 a 20 g/L de butanol. Este tipo de

fermentación por lotes produce bajo rendimiento, y conduce a la pérdida de sustrato y medio residual considerándose un obstáculo en la aplicación del proceso (Jiang et al., 2014).

Las fermentaciones en modo continuo en condiciones de laboratorio son más simples, productivas y fácil de operar. En un estudio comparativo económico, se encontró que este tipo de fermentación es más adecuado para la producción de butanol a gran escala, por el menor tiempo del proceso (Ranjan y Moholkar 2012). Sin embargo, algunas de sus desventajas son la baja cantidad y calidad de producto debido a la dilución del medio, los problemas en el manejo del producto y, la producción de disolventes puede no ser estable en el tiempo y reducirse al disminuir el pH del medio (Klutz et al., 2015).

Una cepa solventogénica poco conocida y tolerante al oxígeno, la *C. pasteurianum* NRRL B-598, mostró estabilidad a largo plazo en cultivos continuos de lecho empacado en procesos continuos, discontinuos y alimentados por lotes (Lipovsky et al., 2016). En la fermentación por lotes las concentraciones más altas de butanol y ABE total fueron de 8,3 y 12,3 g/L respectivamente. En la fermentación continua, a una tasa de dilución de $0,12 \text{ h}^{-1}$ con lecho empacado, se obtuvieron los rendimientos más altos de disolventes y productividad, siendo estos de 32 % y $0,73 \text{ g/L}\cdot\text{h}$. En estos procesos, la cepa mostró una estabilidad excepcional, como lo demostraron las bajas desviaciones en los parámetros del proceso, tanto en los experimentos por lotes y por lotes alimentados, sino también la estabilidad a largo plazo, más de 700 h, o más de 35 tiempos de residencia en el biorreactor en fermentaciones continuas.

2.1.9 Mejora en los procesos de obtención de los ABE

El principal problema asociado con la fermentación ABE por bacterias es la inhibición del proceso debido a la toxicidad del *n*-butanol para el cultivo. La toxicidad mencionada del disolvente

para el cultivo y el agotamiento de nutrientes durante los procesos de fermentación de largo tiempo son dos factores principales que causan la terminación prematura de la fermentación (Kujawska et al., 2015)

La fermentación bacteriana del *n*-butanol podría ser más eficiente con la modificación genética de las bacterias ya utilizadas en la producción de *n*-butanol o mediante la utilización de otra cepa de bacterias, más tolerante al producto producido. Además, el proceso de fermentación podría mejorarse si se utilizaran sustratos nuevos y más baratos, como biomasa lignocelulósica hidrolizada. Además, la reducción de la producción de subproductos y la aplicación de fermentación avanzada y estéril o tecnología posterior podrían afectar positivamente la eficiencia del proceso de fermentación (Kujawska et al., 2015).

La mayor productividad de *n*-butanol por fermentación de la cepa reportada en la literatura es 3% en peso. Los investigadores han analizado las propiedades de las bacterias en términos del impacto de los sustratos de fermentación y la inhibición de los productos en el rendimiento de la producción de disolventes. Se demostró que complementar el medio de fermentación con acetato de sodio mejora la producción de disolventes hasta 33 g/L. La per-vaporación se combinó con reactores de lotes alimentados y se aplicó como una técnica de separación para la recuperación de productos de fermentación. La producción de solventes después de aplicar la técnica de recuperación fue de 165 g/L (Kujawska et al., 2015).

La aplicación de vacío para la recuperación del producto de la fermentación resultó en una disminución del tiempo de fermentación, una utilización máxima de la glucosa y un crecimiento celular superior, y una mayor producción de ABE en comparación con los controles de la fermentación. También se encontró que los intermediarios de fermentación no afectaron la concentración de *n*-butanol en la corriente de condensado eliminada. Los estudios también

mostraron que se pueden fermentar concentraciones de azúcar de hasta 200 g/L, sin embargo, que las concentraciones de sal superiores a 30 g/L afectan negativamente el crecimiento bacteriano (Kujawska et al., 2015).

La recuperación del butanol que se obtiene por medio de destilación tradicional requiere de exceso de energía y no es económicamente viable (Xue et al., 2014); por ello se han desarrollado una gran variedad de técnicas de recuperación de butanol que permitan reducir el costo de su producción, a saber: gas de arrastre (Li et al., 2016), per-vaporación (Borisov y Volkov, 2015), adsorción (Goerlitz et al., 2018), extracción líquido-líquido, entre otros, son los métodos más comúnmente aplicados para integrarse con la fermentación para mejorar la producción de butanol (Grisales y Olivar, 2017),(Outram et al., 2017), (Patakova et al., 2020).

En general se observa que la técnica de destilación presenta requerimientos muy elevados, incluso superiores al contenido energético de butanol (33,1 MJ/kg), estas estimaciones demuestran que un incremento de la concentración de butanol en el efluente del fermentador disminuye el coste energético necesario para purificar el butanol mediante destilación (> 99,5% p/p). La selección de estas técnicas debe balancear variables como la eficiencia, requerimientos energéticos, costos y simplicidad del proceso (Niemistö et al., 2014). En la *Tabla 4* se recogen algunos de los consumos energéticos y ventajas encontradas en bibliografía con estas técnicas.

Tabla 4. *Ventajas y consumos energéticos de los diferentes procesos de recuperación de n-butanol*

Método de recuperación	Ventajas	Desventajas	Mezcla	$x_{\text{ButOH}}^{\text{alim}}$ (%p/p)	E_{neta} (MJ/kg _{ButOH})	Ref.
ABE						
Destilación	Método simple	Requiere mucha energía, baja selectividad	Butanol-Agua	0,5	79,5	(et al., 2014)

Método de recuperación ABE	Ventajas	Desventajas	Mezcla	$x_{\text{ButOH}}^{\text{alim}}$ (%p/p)	E_{neta} (MJ/kg _{ButOH})	Ref.
Adsorción	Bajo requerimiento de energía. Fácil de operar	Baja selectividad, alto costo del material	Butanol-Agua	0,5	8.1	(Goerlitz et al., 2018)
Extracción de gases	Técnica simple. Sin daños al cultivo	Baja selectividad, formación de emulsiones. Baja eficiencia	ABE	0,78	21	(Li et al., 2016)
Extracción Líquido-Líquido	Método fácil y selectivo	Costo del extractante. Formación de emulsiones. Tóxico para el cultivo	ABE	0,8	13,3	(Grisales Díaz y Olivar Tost, 2017)
Extracción líquidos iónicos	Aumento de concentración de butanol	Dificultad para disolver biomasa lignocelulósica	Butanol-Agua	1	5,6	(Motghare et al., 2019)
Per-vaporación	Alta selectividad. Separación en un solo paso	Costo de la membrana. Problemas de ensuciamiento	Butanol-Agua	1	4,3	(Borisov y Volkov, 2015)

Adaptado de (Xue et al., 2014; García, 2017).

2.1.10 Instalaciones Industriales para la producción de biobutanol con fermentaciones integradas a procesos de recuperación

Once empresas chinas ya producen n-butanol a partir de cepas de *Clostridium* (Kujawska et al., 2015). La Saudi Butanol Company (Arabia Saudita) es la primera en producir n-butanol en Medio Oriente. En Brasil, la SGBio Renewable (empresa conjunta de GranBio (Brasil) y Rhodia (Bélgica)) produce el biobutanol a partir de bagazo y paja de caña de azúcar (*Figura 11*).

Figura 11. *Plantas de producción de butanol en el mundo*



Adaptado de Kujawska et al., 2015

En VITO Company (Bélgica) se ha inaugurado una instalación piloto para la demostración de la fermentación de acetona-butanol-etanol integrada con la tecnología de eliminación de butanol in situ por pervaporación. El proyecto realizado en el marco de este estudio se denomina: Demostración de recuperación de productos in situ (ISPR) para mejorar la productividad de los procesos de fermentación (DemoProBio). La planta piloto demostrada se operará a escala de 50 y 150 L para evaluar los requisitos de energía y la eficiencia del proceso en la recuperación de productos de fermentación de ABE. Estados Unidos, y España, también cuentan con plantas industriales para la producción fermentativa de ABE.

A continuación, se hará una muy breve definición de las herramientas que se usaron para el desarrollo de esta investigación.

2.2 Vigilancia Tecnológica

“La Vigilancia Tecnológica” es un proceso organizado, selectivo y permanente, capaz de captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, para seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento y tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse al cambio” (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación-MINCIENCIAS).

“La Bibliometría es la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos para medir la información relacionada con los registros bibliográficos con el fin de identificar y analizar sus características incluyendo tendencias, impactos, agrupaciones o relaciones y formas de comunicación” (Castellanos et al., 2011).

2.3 Análisis cienciométrico

“La Cienciometría es la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos para medir la información científica y tecnológica con el fin de identificar y analizar sus características incluyendo tendencias, impactos, agrupaciones o relaciones y formas de comunicación sus características incluyendo desarrollo científico, agrupaciones o relaciones temáticas, productividad entre otras” (Castellanos et al., 2011). La cienciometría se refiere al análisis cuantitativo de la comunicación científica, las prácticas de I+D y las políticas de ciencia y tecnología.

Esta disciplina ha surgido gracias a la creciente capacidad de almacenamiento y recuperación de información científica utilizando técnicas como el análisis de citas. Los registros de las comunicaciones científicas proporcionan información sobre la dirección institucional, los títulos de los documentos y las relaciones entre ellos, lo que permite identificar patrones y características de los autores y los conjuntos de documentos. La cienciaometría puede relacionar las características de los grupos de investigación con el desarrollo de disciplinas y especialidades científicas (Smelser y Baltes, 2001).

La representación cienciaométrica es formal y sub-simbólica, lo que significa que aún requiere una interpretación. La incertidumbre presente en la distribución relaciona la cienciaometría con el estudio de sistemas complejos y adaptativos. Se utilizan modelos de simulación para analizar el papel de las tecnologías basadas en la ciencia en los procesos de innovación. No obstante, la cienciaometría sigue siendo impulsada por los datos debido a su objetivo de proporcionar indicadores para la gestión de políticas de C&T y de I+D (Smelser y Baltes, 2001).

Los índices cienciaométricos (bibliométricos) se emplean para medir la calidad de las publicaciones científicas (productividad) o el impacto de los trabajos (número de citas recibidas) (Dávila et al., 2009). En condiciones generales, son empleados para valorar la gestión, la calidad y el avance según sea el caso de estudio.

En el contexto de los biocombustibles y a través de la investigación bibliométrica se evidencia un incremento de la producción científica en los últimos años en esta área del desarrollo.

Un análisis bibliométrico de publicaciones sobre investigación económica, de biocombustibles, empleando herramientas como *R-Studio*, *Biblioshiny* y *VOSviewer* muestra que los países como Estados Unidos, India y China son líderes en el mercado de biocombustibles, y entre los países europeos más proclives a desarrollar economías sostenibles, y energía, están el

Reino Unido, Países, Bajos, Alemania y Francia (Hasan et al., 2023). Otro hallazgo de esta investigación es el vínculo entre biocombustible y los ODS (Objetivos del Desarrollo Sostenible) de la ONU (Organización de las Naciones Unidas), tales como: la reducción de la pobreza ODS 1; desarrollo agrícola ODS 2; producción de energía renovable ODS 7; crecimiento económico ODS 8; política de cambio climático, protección ambiental, emisión de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero ODS 13; uso de la tierra ODS 15.

Con el uso de *Core Collection* de *Web of Science* (WoS) como base de datos principal, y con la intención de valorar la evolución del análisis técnico-económico (TEA) dentro del dominio de la cadena de suministro de biocombustibles (CSB), se destaca que la producción y el consumo de biocombustibles necesitan más promoción a través de medidas fiscales y subsidios de precios (Ranjbari et al., 2022).

2.4 Marco legal en Colombia para la producción de biocombustibles

Se calcula que, desde el inicio del Programa Nacional de Biocombustibles en Colombia (Ley 693 de 2001), las mezclas de los biocombustibles con combustibles fósiles han disminuido las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), dejando de lanzar a la atmósfera más de 31 millones de toneladas de estos gases, y más de ocho mil toneladas de material particulado; esto equivale a retirar de circulación entre 400 y 1,5 millones de vehículos al año (Federación Nacional de Biocombustibles, 2022). Aunque en Colombia aún no hay una normativa o una política todavía definida para este compuesto (biobutanol), se han dictado leyes y decretos generales para regular los biocombustibles (*Tabla 5*).

Tabla 5. *Marco legal nacional sobre biocombustibles en Colombia*

Leyes	Generalidad
Ley 693 de 2001	Dicta las normas sobre alcoholes carburantes, y crea estímulos para su producción, comercialización, consumo y otras disposiciones.
Resolución 1076 de 2001	Se crea el programa nacional de biocombustibles relacionado con la problemática del cambio climático.
Ley 788 de 2002 (reforma tributaria)	Se exoneró del pago del impuesto global y de la sobretasa al porcentaje de alcohol carburante que se mezcle con la gasolina motor.
Resolución 1283 de 2006	Se establecen las especificaciones que deberán cumplir los combustibles que se comercialicen para consumo en el territorio nacional.
Conpes 3510 de 2008	Lineamientos de políticas para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.
Resolución 40261	Por la cual se modifica el contenido del alcohol carburante en la mezcla con gasolina motor corriente y extra.

Adaptado de (Federación Nacional de Biocombustibles).

Para enriquecer el desempeño ambiental de los sectores productivos, diferentes gobiernos a nivel mundial fomentan la producción más limpia como una práctica adicional a los instrumentos regulatorios, por esto en nuestro país, se considera que La Política de Producción y Consumo Sostenible, cambia los patrones actuales de producción y consumo de todos los actores de la sociedad nacional, lo que ayuda a mitigar la contaminación, conservar los recursos, beneficiar la integridad ambiental de los bienes y servicios y alentar el uso sostenible de la biodiversidad.

3. Método

En este trabajo se estableció una dinámica de análisis científico de la bibliografía para lograr los objetivos propuestos, y lograr establecer la producción de biobutanol, mediante la

fermentación ABE, como una alternativa de valorización de la melaza panelera. Para lo anterior se emplearon herramientas cuantitativas y de minería de texto, de acuerdo con la metodología propuesta por la Norma UNE 166006:2018, que considera las siguientes etapas:

3.1 Búsqueda y selección de la literatura

Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura científica utilizando la base de datos de Scopus (Elsevier, B.V., 2022) y la base de datos de patentes y metabuscador académico de Lens versión 8.7.1 (Cambia. (2022)). Se diseñó una ecuación de búsqueda que incluyó términos relacionados con el proceso de fermentación ABE, el producto de interés a obtener y el material de estudio. Los términos utilizados fueron "*Acetone-butanol-ethanol Fermentation*", "*ABE Fermentation**", "*Butanol Fermentation**", "*fermentation**", "*butanol*", "*biobutanol*", "*n-butanol*", "*1-Butanol*", "*molasses*", "*sugar cane*", "*sugarcane*", "*Saccharum officinarum*" y "*sugarcane molasses*". El periodo de consulta se definió a partir de 2012 para asegurar la inclusión de la literatura más reciente. Además, se aplicaron criterios de selección para incluir únicamente aquellos estudios que cumplieran con los objetivos y la temática específica del proyecto.

3.2 Análisis de la literatura

Se llevó a cabo un análisis cuantitativo de la literatura obtenida de las bases de datos seleccionadas. Se calcularon indicadores de actividad científica y de inventiva a partir de los documentos indexados, incluyendo artículos científicos y patentes. La herramienta utilizada para la minería de texto y análisis de datos fue el programa especializado VantagePoint (*Search Technology, Versión académica 15.0*), mientras que para la visualización de redes bibliométricas se utilizó el programa VOSviewer (Van Eck y Waltman, 2022). Se identificaron tendencias y

patrones en la investigación sobre la obtención de biobutanol a partir de la melaza de panela, mediante indicadores cientíomicos, análisis de co-ocurrencia de términos y matrices relacionales.

Los indicadores básicos abarcan las áreas de conocimiento más relevantes de esta investigación, así como también el número de publicaciones por año, autores, países e instituciones a nivel mundial y nacional.

4. Resultados

A continuación, se presentan los indicadores y matrices relacionales obtenidos del análisis bibliográfico de la producción científica relacionada con la producción de n-butanol mediante fermentación ABE a partir de subproducto de caña de panela para valorizar residuos para obtener compuestos de valor agregado.

4.1 Actividad científica de investigaciones relacionadas con la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol

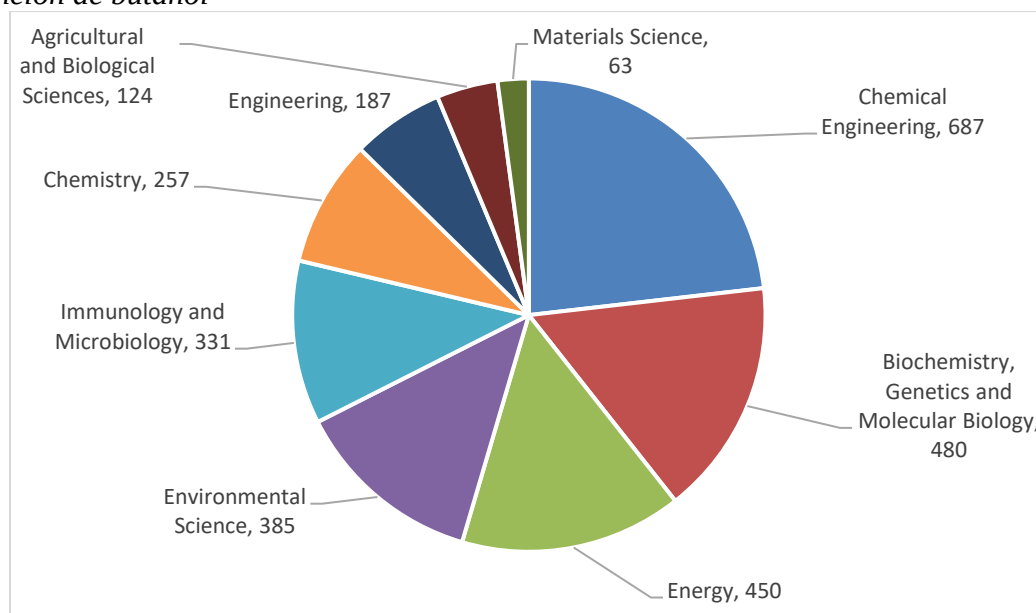
Para tener una visión general de la importancia del proceso de fermentación tipo ABE para la obtención de butanol se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda (*TITLE-ABS-KEY ("Acetone-butanol-ethanol Fermentation" OR "ABE Fermentation*" OR "Butanol Fermentation*") AND TITLE-ABS-KEY (butanol OR biobutanol OR "n-butanol" OR "1-Butanol")) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR > 1999*, con la cual se obtuvieron 1,296 documentos indexados en la base de datos de Scopus, los cuales se distribuyen en 1015 artículos científicos, 100 artículos de revisión, 98 documentos indexados en memorias de eventos

académicos, 64 capítulos de libros y otros documentos 19. En cuanto al análisis de las áreas de investigación muestra varias disciplinas involucradas, como Ingeniería química con 687 registros.

4.1.1 Áreas de investigación en la aplicación de la fermentación ABE

El primer análisis realizado fue el enfocado a las áreas de investigación más relevantes en el tema del diseño y optimización de los procesos de fermentación ABE para la obtención del butanol (*Figura 12*). La bioquímica, genética y biología molecular son áreas relevantes en las publicaciones, con 480 documentos, de temas concernientes a la manipulación molecular de los microorganismos involucrados en el proceso de fermentación, al cultivo de ellos, etc.

Figura 12. Áreas de investigación más relevantes en el estudio de la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol



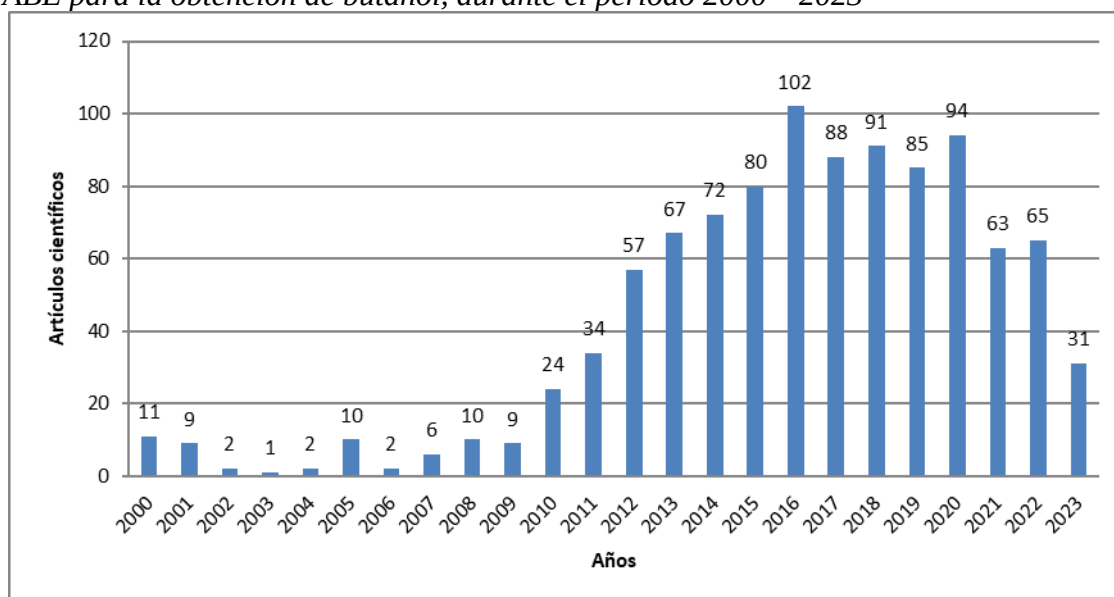
Nota: cálculos basados en información de la base de datos de Scopus (Elsevier B.V., 2022), procesado con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 15.0). Unidad de Bibliometría – CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

La energía es otra disciplina destacada en las publicaciones, con 450 registros. Esto es coherente con el enfoque del proyecto en la producción de biobutanol como un biocombustible, lo que implica la consideración de aspectos energéticos en la evaluación de su factibilidad económica y sostenibilidad. La ciencia ambiental también es relevante en las publicaciones, con 385 registros; esto sugiere que la evaluación de los impactos ambientales y la sostenibilidad de la producción de biobutanol son de gran interés para los investigadores.

4.1.2 Publicaciones por año

El análisis bibliométrico de la evolución de los artículos científicos (1015 documentos), publicados a partir del año 2000 hasta la fecha, permitieron identificar la generación de conocimiento alrededor de la fermentación tipo ABE, para la obtención del butanol (*Figura 13*).

Figura 13. Distribución de publicaciones por año relacionadas con el estudio de la fermentación tipo ABE para la obtención de butanol, durante el periodo 2000 – 2023



Nota: cálculos basados en información de la base de datos de Scopus (Elsevier B.V., 2022), procesado con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 15.0). Unidad de Bibliometría – CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

Este análisis presenta las siguientes características: desde el 2000 hasta el 2005, se observa una fluctuación en el número de publicaciones, con un pico en el 2005 con 10 publicaciones. Sin embargo, a partir del 2006, se observa una tendencia a la baja en el número de publicaciones, con una disminución notable en el 2008 y el 2010 con 2 y 6 publicaciones, respectivamente.

A partir del 2010, se observa un aumento significativo en el número de publicaciones, con un pico en el 2014 con 72 publicaciones. Este aumento se mantiene hasta el 2016, con un total de 102 publicaciones en ese año. Sin embargo, a partir del 2017, se observa una disminución gradual en el número de publicaciones, con fluctuaciones en los años siguientes, pero con una tendencia general a la baja.

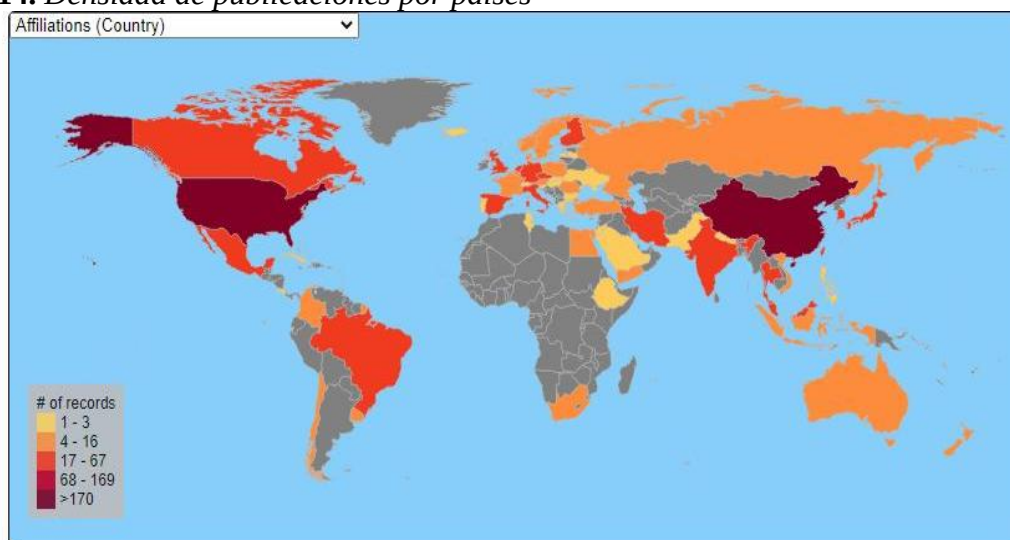
En lo corrido del año 2023, se registran un total de 31 publicaciones hasta la fecha de corte de análisis. Las revistas más importantes en las cuales se realiza la divulgación de los trabajos de investigación son: *Bioresource Technology* con 11 publicaciones, *Applied Energy* con 4, *Fermentation* con 3, *Industrial Crops and Product* con 3 registros, *Biomass and Bioenergy* con 2 y *Fuel* con 2, entre otras.

La divulgación de las investigaciones relacionadas con el proceso de fermentación ABE para la obtención de butanol, de acuerdo con la ecuación de búsqueda planteada se realizó en 234 revistas científicas, dentro de las cuales se destacan: *Bioresource Technology* con 125 publicaciones, *Fuel* con 34 registros, *Applied Microbiology and Biotechnology* y *Biotechnology for Biofuels* con 32 cada una, *Renewable Energy* con 25, *Biomass and Bioenergy* con 23, *Biochemical Engineering Journal* con 20, *Journal of Membrane Science* con 19, *Industrial Crops and Products* con 18 y *Separation and Purification Technology* con 17 publicaciones.

4.1.3. Densidad de publicaciones por países

El desempeño y la producción científica de un país, institución o centro de investigación está directamente relacionada con el número de documentos publicados por año, los países que lideran las investigaciones en el tema de la fermentación ABE para la obtención de butanol son: Estados Unidos con 182 documentos, seguido por Alemania con 54, España con 52, India con 46, Canadá 41. A nivel latinoamericano se tiene que Brasil encabeza la lista con 25 documentos, México con 19, Colombia 15, Chile con 8, Uruguay con 5, Costa Rica con 2 y Cuba con 1. Como se puede notar en la *Figura 14*, la coloración oscura corresponde a aquellos países que han contribuido a esta investigación y tienen mayor número de publicaciones.

Figura 14. *Densidad de publicaciones por países*



Nota: cálculos basados en información de la base de datos de Scopus (Elsevier B.V., 2022), procesado con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 15.0). Unidad de Bibliometría – CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

4.2 Focos tecnológicos

4.2.1 *Lens.org.*

Lens permite descubrir, analizar y trazar mapas del conocimiento de la innovación global. Une la investigación académica con la invención y la industria. En este trabajo, usamos a Lens (Lens patents, versión 8.7.1) para identificar los focos tecnológicos asociados a la producción de biobutanol por fermentación ABE de melazas.

Se definió la siguiente ecuación de búsqueda (Title: (molasses OR ("sugar cane" OR (sugarcane OR ("Saccharum officinarum" OR "sugarcane molasses")))) OR (Abstract: (molasses OR ("sugar cane" OR (sugarcane OR ("Saccharum officinarum" OR "sugarcane molasses")))) OR Claims: (molasses OR ("sugar cane" OR (sugarcane OR ("Saccharum officinarum" OR "sugarcane molasses"))))) AND ((Title: ("Acetone-butanol-ethanol Fermentation" OR ("ABE Fermentation" OR ("Butanol Fermentation" OR fermentation))) OR (Abstract: ("Acetone-butanol-ethanol Fermentation" OR ("ABE Fermentation" OR ("Butanol Fermentation" OR fermentation))) OR Claims: ("Acetone-butanol-ethanol Fermentation" OR ("ABE Fermentation" OR ("Butanol Fermentation" OR fermentation))))) AND (Title: (butanol OR (biobutanol OR (n-butanol OR 1-Butanol))) OR (Abstract: (butanol OR (biobutanol OR (n-butanol OR 1-Butanol))) OR Claims: (butanol OR (biobutanol OR (n-butanol OR 1-Butanol)))))). Se obtuvo 208 patentes.

5. Conclusiones

Los análisis de vigilancia tecnológica realizados en este trabajo de investigación muestran que el tratamiento y aprovechamiento de la melaza de caña panelera está causando un gran interés en el sector industrial y académico a nivel mundial. El análisis de tendencia de las publicaciones por países está directamente relacionado con aspectos como su nivel de desarrollo, las necesidades que tienen en su entorno y la importancia de reducir los impactos ambientales ocasionados por la

actividad humana, en este ámbito, Colombia está en un tercer lugar en América Latina; esto demuestra que en nuestro país ya se están dando los primeros pasos en la realización de investigaciones para el aprovechamiento de materias primas económicas e implementar procesos biotecnológicos para la producción de butanol por fermentación ABE.

La viabilidad económica de la producción de butanol a partir de melaza se verá favorecida por su bajo costo como materia prima, la alta eficiencia de fermentación y la alta disponibilidad que tiene el país. Los avances tecnológicos, las políticas gubernamentales y las condiciones del mercado también pueden influir significativamente en la competitividad de esta ruta de producción de butanol. El mercado del butanol está en auge y se espera que sus precios aumenten en el mercado internacional, por lo que, si Colombia implementa este proceso, es muy posible que se vea ampliamente beneficiada.

Los análisis de las bases de datos ayudarán a los investigadores y a las empresas a tomar decisiones informadas sobre la viabilidad y el desarrollo de proyectos relacionados con la bioeconomía, y la producción sostenible de biocombustibles y productos químicos, evaluando la compleja combinación de factores económicos, tecnológicos, regulatorios, de demanda y competitividad.

Referencias

- Aguado, J. (2020). Selección de alternativas de detoxificación de material lignocelulósico para la producción de biocombustibles oxigenados. [Trabajo de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/41615/TFG-I-1560.pdf?sequence=1>
- Ahn, J. H., Sang, B. I., & Um, Y. (2011). Butanol production from thin stillage using *Clostridium pasteurianum*. *Bioresource Technology*, 102(7), 4934–4937. doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.046
- Ahorsu, R., Medina, F., & Constantí, M. (2018). Significance and Challenges of Biomass as a Suitable Feedstock for Bioenergy and Biochemical Production: A Review. *Energies*, 11(12), 3366. doi.org/10.3390/EN11123366
- Al-Shorgani, N. K. N., Kalil, M. S., Yusoff, W. M. W., & Hamid, A. A. (2018). Impact of pH and butyric acid on butanol production during batch fermentation using a new local isolate of *Clostridium acetobutylicum* YM1. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 339–348. doi.org/10.1016/J.SJBS.2017.03.020
- Al-Shorgani, N. K. N., Al-Tabib, A. I., Kadier, A., Zamil, M. F., Lee, K. M., & Kalil, M. S. (2019). Continuous Butanol Fermentation of Dilute Acid-Pretreated De-oiled Rice Bran by *Clostridium acetobutylicum* YM1. *Scientific Reports* 9(1), 1–13. doi.org/10.1038/s41598-019-40840-y
- Amelio, A., Van der Bruggen, B., Lopresto, C., Verardi, A., Calabro, V., & Luis, P. (2016). Pervaporation membrane reactors: Biomass conversion into alcohols. *Membrane Technologies for Biorefining* 331–381. doi.org/10.1016/B978-0-08-100451-7.00014-1

- BASF SE. (2023). n-Butanol. Recuperado de: <https://products.basf.com/global/en/cp/n-butanol.html>
- Becerra, M., Cerdán, M. E., & González-Siso, M. I. (2015). Biobutanol from cheese whey. *Microbial Cell Factories*, 14(1), 1–15. doi.org/10.1186/s12934-015-0200-1
- Berezina, O. V., Zakharova, N. V., Brandt, A., Yarotsky, S. V., Schwarz, W. H., & Zverlov, V. V. (2010). Reconstructing the clostridial n-butanol metabolic pathway in *Lactobacillus brevis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87(2), 635–646. doi.org/10.1007/S00253-010-2480-Z
- Bharathiraja, B., Jayamuthunagai, J., Sudharsanaa, T., Bharghavi, A., Praveenkumar, R., Chakravarthy, M., & Devarajan, Y. (2017). Biobutanol - An impending biofuel for future: A review on upstream and downstream processing techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 788–807. doi.org/10.1016/J.RSER.2016.10.017
- Boletín de consumo. Exportaciones de endulzantes colombiano. Fondo de Fomento Panelero. (2022). Recuperado de: <https://fedepanela.org.co/gremio/wp-content/uploads/2023/04/Boletin-de-consumo-I-Exportaciones-de-endulzantes-colombianos.pdf>
- Borisov, I. L., & Volkov, V. V. (2015). Thermopervaporation concept for biobutanol recovery: The effect of process parameters. *Separation and Purification Technology*, 146, 33–41. doi.org/10.1016/j.seppur.2015.03.023
- Buehler, E. A., & Mesbah, A. (2016). Kinetic Study of Acetone-Butanol-Ethanol Fermentation in Continuous Culture. *PLoS ONE* 11(8), e0158243. doi:10.1371/journal.pone.0158243
- Cárdenas, H. A. (2019). Riesgos Ambientales y Sociales en la Producción de Panela. Recuperado de: <https://www.asobancaria.com/documentos/biblioteca-de-innovacion-financiera/Riesgos-Ambientales-y-Sociales-Sector-Panela.pdf>

- Castellanos, O., Fúquene, A., & Ramírez, D. C. (2011). Análisis de tendencias: de la información hacia la innovación. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7227>
- Celis, P. A., Calderón, D. A., Cristancho, L. M., & Cruz, M. N. (2017). Manejo Ambiental Trapiche Panelero. https://www.academia.edu/33316814/Manejo_Ambiental_Trapiche_Panelero
- Chen, Y., Ren, H., Liu, D., Zhao, T., Shi, X., Cheng, H., Zhao, N., Li, Z., Li, B., Niu, H., Zhuang, W., Xie, J., Chen, X., Wu, J., & Ying, H. (2014). Enhancement of n-butanol production by in situ butanol removal using permeating–heating–gas stripping in acetone–butanol–ethanol fermentation. *Bioresource Technology*, 164, 276–284. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.107.
- Cheng, H. H., Whang, L. M., Chan, K. C., Chung, M. C., Wu, S. H., Liu, C. P., Tien, S. Y., Chen, S. Y., Chang, J. S., & Lee, W. J. (2015). Biological butanol production from microalgae-based biodiesel residues by *Clostridium acetobutylicum*. *Bioresource Technology*, 184, 379–385. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.017
- Claassen, P. A. M., Budde, M. A. W., & López-Contreras, A. M. (2000). Acetone, Butanol and Ethanol Production from Domestic Organic Waste by Solventogenic Clostridia. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 2(1), 39–44. https://www.unboundmedicine.com/medline/citation/10937486/Acetone,_butanol_and_ethanol_production_from_domestic_organic_waste_by_solventogenic_clostridia.
- CONPES 3934. (2018). Consejo nacional de política económica y social. República de Colombia. Departamento nacional de planeación. Política de crecimiento verde. Recuperado de: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3934.pdf>

Cruz Ramos, I. (2021). Síntesis de catalizadores para transformación de etanol a 1-butanol.

Instituto Politécnico Nacional. <https://tesis.ipn.mx/jspui/password-login;jsessionid=C620C44B2484DFD4F770EBF56F2C367F>

Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., & Mohtasebi, B. (2019). Biofuels: Their characteristics and analysis. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*, 277–325. doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00014-X.

Dávila Rodríguez, M., Guzmán Sáenz, R., Arroyo, H. M., Piñeres Herera, D., De La, D., Barranco, R., & Caballero-Urbe, C. V. (2009). Bibliometría: conceptos y utilidades para el estudio médico y la formación profesional. *Revista Salud Uninorte*, 25(2), 319–330. ISSN 2011-7531. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522009000200011

Durán P, V. R. (2015). Producción de biobutanol a partir de suero de quesería usando una cepa mutante de *Clostridium acetobutylicum*. [Trabajo de Grado en Doctorado]. Universidad de Autónoma de Aguascalientes. <http://hdl.handle.net/11317/349>.

Dürre, P. *Systems Biology of Clostridium*. (2014). Editorial Imperial College Press. 292p. ASIN: B00KT0WV8A. ISBN-13 978-1783264407. doi.org/10.1142/p936

Evans, A., & Nagele, R. (2018). A Lot to Digest: Advancing Food Waste Policy in the United States. *Natural Resource Journal*, 58(1), 177–214. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol58/iss1/7>

Exactitude Consultancy. (2024). Mercado mundial de n-butanol. Recuperado de: <https://exactitudeconsultancy.com/es/blog/2023/10/05/n-crecimiento-del-mercado-de-butanol/>

- Ezeji, T. C., Qureshi, N., & Blaschek, H. P. (2012). Microbial production of a biofuel (acetone–butanol–ethanol) in a continuous bioreactor: impact of bleed and simultaneous product removal. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 36(1), 109–116. doi.org/10.1007/S00449-012-0766-5
- Fajardo, E. E. & Sarmiento, S. C. (2007). Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de *saccharomyces cerevisiae*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/8279>.
- FAO. Food and Agriculture Organization. (2023). Bioeconomy is a catalyst for agrifood systems transformation to greater sustainability. Recuperado de: <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-bioeconomy-agrifood-systems-science-innovation-forum-2023/es>
- Farmanbordar, S., Amiri, H., & Karimi, K. (2020). Synergy of municipal solid waste co-processing with lignocellulosic waste for improved biobutanol production. *Waste Management*, 118, 45–54. doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.053
- Ferreruela, J. S. (2016). Análisis tecno-económico del proceso de producción de butanol a partir de biomasa lignocelulósica por vía termoquímica. Tesis de pregrado. [Trabajo de Grado en Ingeniería Química Industrial y del medio Ambiente]. Universidad Politécnica de Madrid. <https://oa.upm.es/40350/>
- Federación Nacional de Biocombustibles. (2022). Biocombustibles determinantes en la transición energética del país al 2030. Recuperado de: <https://fedebiocombustibles.com/2022/05/24/biocombustibles-determinantes-en-la-transicion-energetica-del-pais-al-2030/>

Federación Nacional de Biocombustibles. (n.d.). (2023). Normatividad de la Agroindustria de los Biocombustibles. Recuperado de: <https://fedebiocombustibles.com/normatividad/>

Gao, K., Orr, V., & Rehmann, L. (2016). Butanol fermentation from microalgae-derived carbohydrates after ionic liquid extraction. *Bioresource Technology*, 206, 77–85. doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.036

Gao, R., Xiong, L., Wang, M., Peng, F., Zhang, H., & Chen, X. (2022). Production of acetone-butanol-ethanol and lipids from sugarcane molasses via coupled fermentation by *Clostridium acetobutylicum* and oleaginous yeasts. *Industrial Crops and Products*, 185, 115131. doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115131

García, J. O. (2019). Análisis de sistemas bifásicos acuosos con sales inorgánicas para separar la mezcla bioproducto-agua. [Trabajo de Grado en Maestría en Ciencias en Ingeniería Química]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4913

García R.A. (2017). Recuperación de biobutanol para la producción de combustibles mediante ciclos de adsorción-desorción [Tesis Doctoral en Ingeniería Química]. Universidad Complutense de Madrid.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=111447&info=resumen&idioma=SPA>

García, V., Pääkkilä, J., Ojamo, H., Muurinen, E., & Keiski, R. L. (2011). Challenges in biobutanol production: How to improve efficiency? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 964–980. doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.008

Gates, B. How to avoid a climate disaster: The Solutions we have and the breakthroughs we need. Random House Audio (Publisher). Audiolibro. 2021. ASIN B082QYFLDR.

- Ge, S., Brindhadevi, K., Xia, C., Salah Khalifa, A., Elfakhany, A., Unpaprom, Y., & Doan, H. Van. (2022). Enhancement of the combustion, performance and emission characteristics of spirulina microalgae biodiesel blends using nanoparticles. *Fuel*, 308, 121822. doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121822
- Geng, Z., et al. 2024. The fuel property and application prospect of water-containing biofuel from *Clostridium acetobutylicum* fermentation products. *Biomass and Bioenergy* 186, 2024, 107263. doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107263
- Goerlitz, R., Weisleder, L., Wuttig, S., Trippel, S., Karstens, K., Goetz, P., & Niebelschuetz, H. (2018). Bio-butanol downstream processing: regeneration of adsorbents and selective exclusion of fermentation by-products. *Adsorption* 24(1), 95-104. doi.org/10.1007/S10450-017-9918-X
- Green, E. M. (2011). Fermentative production of butanol-the industrial perspective. *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 337–343. doi.org/10.1016/j.copbio.2011.02.004
- Grisales Díaz, V. H., & Olivar Tost, G. (2017). Techno-economic analysis of extraction-based separation systems for acetone, butanol, and ethanol recovery and purification. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(1), 1–13. doi.org/10.1186/S40643-017-0142-Z/FIGURES/5
- Gurunathan, B., Sahadevan, R., Zakaria, Z.A. (2021). Biofuels and Bioenergy: Opportunities and Challenges. Ed. Elsevier. 523p. ISBN-13978-0323852692.
- Hasan, M., Abedin, M. Z., Amin, M. Bin, Nekmahmud, M., & Oláh, J. (2023). Sustainable biofuel economy: A mapping through bibliometric research. *Journal of Environmental Management*, 336 (15), 117644. doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.117644

- Huang, J., You, J. X., Liu, H. C., & Song, M. S. (2020). Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda. *Reliability Engineering & System Safety*, 199, 106885. doi.org/10.1016/J.RESS.2020.106885
- Huesemann, M. H., Kuo, L. J., Urquhart, L., Gill, G. A., & Roesijadi, G. (2012). Acetone-butanol fermentation of marine macroalgae. *Bioresource Technology*, 108, 305–309. doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.12.148
- Hui, X., Niemeyer, K. E., Brady, K. B., & Sung, C. J. (2017). Reduced chemistry for butanol isomers at engine-relevant conditions. *Energy and Fuels*, 31(1), 867–881. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01857
- Infante C. C. (2016). Evaluación tecno-económica de la producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha. [Tesis de Grado en Grado en Ingeniería Química]. Universidad de Valladolid. https://uvadoc.uva.es/handle/10324/18561
- Jacobo, J., Obando, J., & Cardona, C. A. (2011). Analysis of the production of biobutanol in the acetobutylc fermentation with *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4 ATCC13564. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* (58), 36–45. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302011000200004&script=sci_abstract
- Jiang, W., Zhao, J., Wang, Z., & Yang, S. T. (2014). Stable high-titer n-butanol production from sucrose and sugarcane juice by *Clostridium acetobutylicum* JB200 in repeated batch fermentations. *Bioresource Technology*, 163, 172–179. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.047
- Jiménez, C. M., Vattuone, M.A., Sampietro, D. A. (2017). Efecto de la melaza en la biodegradación de residuos de caña de azúcar: Evolución de las poblaciones celulolíticas

- microbianas nativas del suelo cañero y mineralización poscosecha. Editorial Académica Española. 56p. ISBN: 978-3-639-53303-3. <http://hdl.handle.net/11336/110920>
- Kataoka, N., Tajima, T., Kato, J., Rachadech, W., & Vangnai, A. S. (2011). Development of butanol-tolerant *Bacillus subtilis* strain GRSW2-B1 as a potential bioproduction host. *AMB Express* 1(10). doi.org/10.1186/2191-0855-1-10
- Klutz, S., Magnus, J., Lobedann, M., Schwan, P., Maiser, B., Niklas, J., Temming, M., & Schembecker, G. (2015). Developing the biofacility of the future based on continuous processing and single-use technology. *Journal of Biotechnology*, 213, 120-130. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.06.388
- Knoshaug, E. P. & Zhang, M. (2009). Butanol tolerance in a selection of microorganisms. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 153(1–3), 13–20. doi.org/10.1007/S12010-008-8460-4
- Kolesinska, B., Fraczyk, J., Binczarski, M., Modelska, M., Berlowska, J., Dziugan, P., Antolak, H., Kaminski, Z. J., Witonska, I. A., & Kregiel, D. (2019). Butanol Synthesis Routes for Biofuel Production: Trends and Perspectives. *Materials* 12(3). doi.org/10.3390/MA12030350
- Kujawska, A., Kujawski, J., Bryjak, M. & Kujawski, W. (2015). ABE fermentation products recovery methods - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48, 648–661. doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.028
- Kushwaha, D., Srivastava, N., Mishra, I., Upadhyay, S.N, & Mishra, P. K. (2018). Recent trends in biobutanol production. *Reviews in Chemical Engineering*. doi.org/10.1515/revce-2017-0041

- Lagos-Burbano, E., & Castro-Rincón, E. (2019). Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes. *Agronomia Mesoamericana*, 30(3), 917-934. doi.org/10.15517/am.v30i3.34668
- Li, S. Y., Chiang, C. J., Tseng, I. T., He, C. R., & Chao, Y. P. (2016). Bioreactors and in situ product recovery techniques for acetone–butanol–ethanol fermentation. *FEMS Microbiology Letters*, 363(13), 107. https://doi.org/10.1093/femsle/fnw107
- Lipovsky, J., Patakova, P., Paulova, L., Pokorny, T., Rychtera, M., & Melzoch, K. (2016). Butanol production by *Clostridium pasteurianum* NRRL B-598 in continuous culture compared to batch and fed-batch systems. *Fuel Processing Technology*, 144, 139–144. doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.020
- Liu, Y., Yuan, Y., Ramya, G., Mohan Singh, S., Thuy Lan Chi, N., Pugazhendhi, A., Xia, C., & Mathimani, T. (2022). A review on the promising fuel of the future – Biobutanol; the hindrances and future perspectives. *Fuel*, 327, 125166. doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125166
- Lúcia García, E. (2018). Diseño de un reactor biológico para la producción de biobutanol [Tesis de grado en Ingeniería Química]. Universidad de Cádiz. https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/20043
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., & Parker, J. (2004). Brock, Biología de los Microorganismos. Décima edición. Pearson Educación, Madrid. p. 405-407. ISBN: 84-205-3679-2.
- Magalhães, A. I., De Carvalho, J. C., De Carvalho Neto, D. P., & Soccol, C. R. (2020). Are Sugarcane Molasses Competitive Substrates for Bio-based Platform Chemicals? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(14), 4073–4074. doi.org/10.1021/ACS.JAFC.0C01519

- Malaviya, A., Jang, Y.-S., & Lee, S. Y. (2012). Continuous butanol production with reduced byproducts formation from glycerol by a hyper producing mutant of *Clostridium pasteurianum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93, 1485–1494. doi.org/10.1007/s00253-011-3629-0
- Mathier, D., Saleme, P., Bragachini, M., Sánchez, F., Bragachini, M., Méndez, J. (2013). La caña de azúcar como cultivo energético.
- MINAGRICULTURA (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). (2021). Cadena Agroindustrial de la panela. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Panela/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Moscoso R., J. A. (2016). Análisis experimental del uso de mezclas de gasolina-butanol en un motor de encendido por chispa [Tesis de Grado en Ingeniería Mecánica]. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://investigacion.pucp.edu.pe/grupos/gi-team/tesina/analisis-experimental-del-uso-mezclas-gasolina-butanol-motor-encendido-chispa/>
- Morawa K.E., Figueiredo, J.L., Pereira, F.R. 2024. Catalytic valorization of industrial grade sugarcane molasses to 5-hydroxymethylfurfural in water. *Catalysis Today* 441, 114898. doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114898
- Morrison R.T, Boyd R.N. 1998a. Química Orgánica. Ed. Addison Wesley Longman México. Quinta Edición. 1998. p.622. ISBN: 968-444-340-4.
- Motghare, K. A., Wasewar, K. L., & Shende, D. Z. (2019). Separation of Butanol Using Tetradecyl(trihexyl)phosphonium Bis(2,4,4-trimethylpentyl)phosphinate, Oleyl Alcohol, and Castor Oil. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 64(12), 5079–5088. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00211>

- Mulvaney, D. Sustainable Energy Transitions: Socio-Ecological Dimensions of Decarbonization. 2020. Editorial Palgrave Macmillan. 1st ed. 203p. ISBN-13 978-3030489113. ASIN: B08PND97LM.
- Murcia-Pardo, M. L., & Ramírez-Durán, J. (2016). Reconversión del sistema regional de producción de semilla de caña para la agroindustria panelera en Boyacá y Santander. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 75–87. doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:559
- Narueworanon, P., Laopaiboon, L., & Laopaiboon, P. (2021). Capability of immobilized *Clostridium beijerinckii* TISTR 1461 on lotus stalk pieces to produce butanol from sugarcane molasses. *Processes*, 9(4). doi.org/10.3390/PR9040573
- Ndaba, B., Chiyanzu, S., Marx, I., & Marx, S. (2015). n-Butanol derived from biochemical and chemical routes: A review n-Butanol derived from biochemical and chemical routes: A review. *Biotechnology Reports*, 8, 1–9. doi.org/10.1016/j.btre.2015.08.001
- Ni, Y., Wang, Y., & Sun, Z. (2012). Butanol Production from Cane Molasses by *Clostridium saccharobutylicum* DSM 13864: Batch and Semicontinuous Fermentation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 166(8), 1896–1907. doi.org/10.1007/S12010-012-9614-Y
- Ni, Y., Xia, Z., Wang, Y., & Sun, Z. (2013). Continuous butanol fermentation from inexpensive sugar-based feedstocks by *Clostridium saccharobutylicum* DSM 13864. *Bioresource Technology*, 129, 680–685. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.142
- Nielsen, D. R., Leonard, E., Yoon, S. H., Tseng, H. C., Yuan, C., & Prather, K. L. J. (2009). Engineering alternative butanol production platforms in heterologous bacteria. *Metabolic Engineering*, 11(4–5), 262–273. doi.org/10.1016/j.ymben.2009.05.003

- Niemistö, J., Saavalainen, P., Isomäki, R., Kolli, T., Huuhtanen, M., & Keiski, R. L. (2014). Biobutanol production from biomass. In *Biofuel Technologies: Recent Developments* (pp. 443–470). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34519-7_17
- Niglio, S., Marzocchella, A., & Rehmann, L. (2019). Clostridial conversion of corn syrup to Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) via batch and fed-batch fermentation. *Heliyon*, 5(3), e01401. doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01401
- Noriega, M.L.J. (2017). Producción de butanol por *Clostridium acetobutylicum* en cultivo semicontinuo. [Tesis de Grado en Doctor en Ciencias]. CINVESTAV-Instituto Politécnico Nacional. <https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/1393>
- Onay, M. (2020). Enhancing carbohydrate productivity from *Nannochloropsis gaditana* for biobutanol production. *Energy Reports*, 6, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.019>
- Outram, V., Lalander, C., Lee, J. G. M., Davies, E. T., & Harvey, A. P. (2017). Applied in situ product recovery in ABE fermentation. *Biotechnology Progress*, 33(3), 563. doi.org/10.1002/BTPR.2446
- Patakova, P., Branska, B., Lin, Z., Wu, P., Liu, H., Drahokoupil, M., Zhou, Y., Paulova, L., Zhang, J., & Melzoch, K. (2020). Microbial production of butanol from food industry waste. In *Food Industry Wastes: Assessment and Recuperation of Commodities* (pp. 163–180). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817121-9.00008-5>
- Poe, N. (2019). Acetone, Butanol, and Ethanol (ABE) Production from Food Waste via *Clostridium beijerinckii*. [Tesis de grado en Maestría de Ciencias de la Vida]. Virginia Polytechnic Institute and State University. <http://hdl.handle.net/10919/96601>

Pugazhendhi, A., Mathimani, T., Varjani, S., Rene, E. R., Kumar, G., Kim, S. H., Ponnusamy, V.

K., & Yoon, J. J. (2019). Biobutanol as a promising liquid fuel for the future - recent updates and perspectives. *Fuel*, 253, 637–646. doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.139

Qureshi, N., Saha, B. C., Dien, B., Hector, R. E., & Cotta, M. A. (2010). Production of butanol (a biofuel) from agricultural residues: Part I-Use of barley straw hydrolysate 5. *Biomass and Bioenergy*, 34, 559–565. doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.12.024

Qureshi, N., Saha, B. C., Hector, R. E., Hughes, S. R., & Cotta, M. A. (2008). Butanol production from wheat straw by simultaneous saccharification and fermentation using *Clostridium beijerinckii*: Part I—Batch fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 32(2), 168–175. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.07.004

RAE. Real Academia Española. 2019a. https://www.rae.es/diccionario-estudiante/melaza

RAE. Real Academia Española. 2019b. https://www.rae.es/diccionario-estudiante/microorganismo

Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Shevchenko, T., Scagnelli, S. D., Lam, S. S., Varjani, S., Aghbashlo, M., Pan, J., & Tabatabaei, M. (2022). An inclusive trend study of techno-economic analysis of biofuel supply chains. *Chemosphere*, 309, 136755. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136755

Razack, S.A., Geethalakshmi, Mohankumar, T.B., Durga D.S., Duraiarasan, S. Current status and perspective on algal biomass-based biobutanol production. Cap. 11. En: Advances and Developments in Biobutanol Production. Advances in Pollution Research. Woodhead Publishing. 2023. p.303-327. ISBN 978-0-323-91178-8. https://doi.org/10.1016/C2020-0-04157-5

- Rühl, J., Schmid, A., & Blank, L. M. (2009). Selected *Pseudomonas putida* Strains Able To Grow in the Presence of High Butanol Concentrations. *Applied And Environmental Microbiology*, 75(135), re. <https://doi.org/10.1128/aem.00225-09>
- Sarchami, T., Munch, G., Johnson, E., Kießlich, S., & Rehmann, L. (2016). A Review of Process-Design Challenges for Industrial Fermentation of Butanol from Crude Glycerol by Non-Biphasic *Clostridium pasteurianum*. *Fermentation* 2(2), 13. doi.org/10.3390/fermentation2020013
- Shen, C. R., Lan, E. I., Dekishima, Y., Baez, A., Myung Cho, K., & Liao, J. C. (2011). Driving Forces Enable High-Titer Anaerobic 1-Butanol Synthesis in *Escherichia coli*. *Applied Environmental Microbiology*, 77. doi.org/10.1128/AEM.03034-10
- Shen, C. R., & Liao, J. C. (2008). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for 1-butanol and 1-propanol production via the keto-acid pathways. *Metabolic Engineering*, 10(6), 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2008.08.001>
- SIPA-Fedepanela. (2022). Cifras del Sector para 2021. <http://www.sipa.org.co/wp/index.php/2022/03/01/areas-rendimiento-y-produccion-2021/>
- Smelser, N. J., & Baltes, P. B. (2001). International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. In L. Leydesdorff (Ed.), International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (pp. 13752–13755). Scientometrics, Editor(s). <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/03200-ista>. (2023). N-butanol global market volume 2015-2029. <https://www.statista.com/statistics/1245211/n-butanol-market-volume-worldwide/>
- Steen, E. J., Chan, R., Prasad, N., Myers, S., Petzold, C. J., Redding, A., Ouellet, M., Keasling, J. D., & Ouellet -MOuellet, M. (2008). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*

- for the production of n-butanol. *Microbial Cell Factories* 7(36). doi.org/10.1186/1475-2859-7-36
- Su, C., Qi, L., Cai, D., Chen, B., Chen, H., Zhang, C., Si, Z., Wang, Z., Li, G., & Qin, P. (2020). Integrated ethanol fermentation and acetone-butanol-ethanol fermentation using sweet sorghum bagasse. *Renewable Energy*, 162, 1125–1131. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.119>
- Tellez, C. Sostenibilidad y Sustentabilidad. 2022. 90p. ASIN: B0B434N4HH2022.
- Thang, V. H., Kanda, K., & Kobayashi, G. (2010). Production of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) in direct fermentation of cassava by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum* N1-4. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 161(1–8), 157–170. doi.org/10.1007/S12010-009-8770-1
- Transparency Market Research. (2018). N-butanol Market Global Industry Report, 2031. Chemicals and Materials. <https://www.transparencymarketresearch.com/n-butanol-market.html>
- Trindade, W. R. da S., & Santos, R. G. dos. (2017). Review on the characteristics of butanol, its production and use as fuel in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 642–651. doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.213
- Valles, A., Álvarez-Hornos, J., Capilla, M., San-Valero, P., & Gabaldón, C. (2021). Fed-batch simultaneous saccharification and fermentation including in-situ recovery for enhanced butanol production from rice straw. *Bioresource Technology*, 342, 126020. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126020

- Verified Market Research. (2021). N-butanol Market Size, Share, Opportunities, Growth & Forecast. Chemicals and Materials. <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/n-butanol-market/>
- Vivek, N., Nair, L.M., Mohan B., Salini Chandrasekharan Nair, S.C., Sindhu, R., Pandey, A., Shurpali, N., Binod, P. (2019). Bio-butanol production from rice straw – Recent trends, possibilities, and challenges. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100224. doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100224
- Xue, C., Zhao, J. B., Chen, L. J., Bai, F. W., Yang, S. T., & Sun, J. X. (2014). Integrated butanol recovery for an advanced biofuel: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(8), 3463–3474. doi.org/10.1007/S00253-014-5561-6
- Xue, C., Zhao, J., Chen, L., Yang, S. T., & Bai, F. (2017). Recent advances and state-of-the-art strategies in strain and process engineering for biobutanol production by *Clostridium acetobutylicum*. *Biotechnology Advances*, 35(2), 310–322. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.01.007
- Yadav, S., Rawat, G., Tripathi, P., & Saxena, R. K. (2014). A novel approach for biobutanol production by *Clostridium acetobutylicum* using glycerol: A low-cost substrate. *Renewable Energy*, 71, 37–42. doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.004
- Yu, L., Xu, M., Tang, I. C., & Yang, S. T. (2015). Metabolic engineering of *Clostridium tyrobutyricum* for n-butanol production through co-utilization of glucose and xylose. *Biotechnology and Bioengineering*, 112(10), 2134–2141. doi.org/10.1002/BIT.25613
- Zhang, S., Wang, J., & Jiang, H. (2021). Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food Chemistry*, 346, 128860. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128860>

Zheng, J., Tashiro, Y., Wang, Q., & Sonomoto, K. (2015). Recent advances to improve fermentative butanol production: Genetic engineering and fermentation technology. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 119(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.05.023>