

ASPECTOS TECNOLÓGICOS RELACIONADOS AL RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD
DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BUTANOL



LUZ ADRIANA CAMPO MUELAS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN, CAUCA
2022

ASPECTOS TECNOLÓGICOS RELACIONADOS AL RENDIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD
DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BUTANOL

LUZ ADRIANA CAMPO MUELAS

Trabajo de grado en modalidad investigación para optar por el título de Ingeniero
Agroindustrial

DIRECTOR

DEYANIRA MUÑOZ MUÑOZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN, CAUCA
2022

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO REFERENCIAL	13
1.1 BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y BIOCOMBUSTIBLE	13
1.1.1 Concepto y orígenes	13
1.1.2 Clasificación de biomasa y biocombustibles	13
1.2 BUTANOL	16
1.2.1 Rutas de síntesis químicas	16
1.2.2 Rutas de síntesis biotecnológicas	17
1.3 BIBLIOMETRÍA	18
1.3.1 Análisis bibliométrico	18
1.3.2 Base de datos y Software VOSviewer	18
1.3.3 Indicador bibliométrico	19
1.4 PARÁMETRO DE PROCESO	21
1.4.1 Rendimiento	21
1.4.2 Productividad	22
2. METODOLOGÍA	23
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.1 Ecuación de búsqueda	23

2.1.2	Identificación y selección de información	23
2.1.3	Evaluación de información mediante software VOSviewer	23
2.2	ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	24
2.2.1	Selección de indicadores bibliométricos	24
2.2.2	Análisis de los indicadores bibliométricos	24
2.3	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE BUTANOL	24
2.3.1	Análisis de los parámetros de rendimiento	24
2.3.2	Análisis del parámetro de productividad	25
2.3.3	Evaluación conjunta de parámetros	25
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1	TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BUTANOL	26
3.1.1	Tecnologías de transformación de biomasa en energía	26
3.1.2	Tecnologías empleadas en la ruta de síntesis biotecnológica	28
3.1.3	Tecnologías empleadas en la ruta de síntesis química	36
3.1.4	Evaluación de información en software VOSviewer	38
3.2	ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	62
3.2.1	Índice de productividad personal	62
3.2.2	Índice H	63
3.2.3	Índice de colaboración	68
3.2.4	Factor de impacto (FI)	70
3.3	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE BUTANOL	71

7. CONCLUSIONES	81
8. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de pretratamientos	32
Tabla 2. Términos agrupados por clúster en Scopus	42
Tabla 3. Términos agrupados por clúster en Web of Science	45
Tabla 4. Nombre de instituciones y país de origen en Scopus	48
Tabla 5. Nombre de instituciones y país de origen en Web of Science	50
Tabla 6. Países de origen de las publicaciones en Scopus	52
Tabla 7. Países de origen de las publicaciones en Web of Science	55
Tabla 8. Listado de autores agrupados por clúster en Scopus	58
Tabla 9. Listado de autores agrupados por clúster en Web of Science	61
Tabla 10. Índices de productividad personal	63
Tabla 11. Valores para calcular el índice de colaboración para Scopus	68
Tabla 12. Valores para calcular el índice de colaboración para Web of Science	69
Tabla 13. Valores para calcular el factor de impacto	71
Tabla 14. Siglas de las diferentes colecciones de cultivos microbianos	72
Tabla 15. Aspectos tecnológicos relacionados al butanol	73
Tabla 16. Valores de correlación de Pearson y Valor P	75
Tabla 17. Valores del coeficiente de variación, máximos y mínimos	78
Tabla 18. Condiciones de producción de butanol	79
Tabla 19. Parámetros en la producción de etanol	80

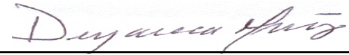
LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ruta química de obtención de butanol	17
Figura 2. Tecnologías de transformación energética de biomasa	26
Figura 3. Vía metabólica de fermentación ABE	34
Figura 4. Producción petroquímica de n-butanol	37
Figura 5. Co-ocurrencia de términos en Scopus para residuos lignocelulósicos	39
Figura 6. Co-ocurrencia de términos en Web of Science para residuos	40
Figura 7. Co-ocurrencia de los términos en Scopus para bagazo de caña de azúcar	41
Figura 8. Relación de los años y los términos en Scopus	43
Figura 9. Co-ocurrencia de los términos en Web of Science para bagazo	44
Figura 10. Relación de los años y los términos en Web of Science	46
Figura 11. Relación de los años e instituciones en Scopus	47
Figura 12. Relación de los años e instituciones en Web of Science	49
Figura 13. Relación de los años y los países en Scopus	51
Figura 14. Densidad de los países en Scopus	53
Figura 15. Relación de los años y los países en Web of Science	54
Figura 16. Densidad de los países en Web of Science	56
Figura 17. Relación de los años y los autores en Scopus	57
Figura 18. Densidad de los autores en Scopus	59
Figura 19. Relación de los años y los autores en Web of Science	60

Figura 20. Densidad de los autores en Web of Science	62
Figura 21. Índice H para el autor Maciel Filho Rubens en Scopus	64
Figura 22. Índice H para el autor Maciel Filho Rubens en Web of Science	65
Figura 23. Índice H para el autor Pinto Mariano Adriano en Scopus	65
Figura 24. Índice H para el autor Pinto Mariano Adriano en Web of Science	66
Figura 25. Índice H para los artículos de la ecuación de búsqueda en Scopus	67
Figura 26. Índice H para los artículos de la ecuación de búsqueda en Web of Science	67
Figura 27. Índice de colaboración a través del tiempo	70
Figura 28. Dispersión de azúcar inicial y producción	76
Figura 29. Dispersión de azúcar inicial y productividad	76
Figura 30. Dispersión de azúcar inicial y rendimiento	77
Figura 31. Dispersión de parametros conjuntos	78

Nota de aceptación:

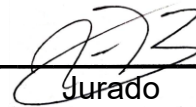
La directora y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autora y lo encuentran satisfactorio.



DEYANIRA MUÑOZ MUÑOZ
Directora



Presidente del jurado



Jurado

Popayán, 22 de Diciembre de 2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, ya que me regalo la vida y me permitió llegar a culminar esta etapa en mi vida profesional.

A mis padres por apoyarme y alentarme a estudiar una carrera profesional; por el sacrificio, amor y dedicación que me dieron en todos mis años de vida.

A mis hermanos mayores por ser mi ejemplo de vida, apoyarme y guiarme en todo momento, y a mi hermana menor por el cariño y aliento dado.

A todo aquellos compañeros con los que compartí esta etapa.

RESUMEN

El butanol de segunda generación ha tomado gran interés por el gran potencial en múltiples aplicaciones por ejemplo como biocombustible y/o producto químico. La producción a partir de biomasa lignocelulósica ayuda a la rentabilidad y posible comercialización, desde una perspectiva de proceso sostenible. Sin embargo, aún existen inconvenientes en las tecnologías y procesos que requieren de más investigación y conocimientos en rutas metabólicas, microorganismos eficientes, integración de los procesos, materias primas de bajo costo, análisis tecno-económicos y análisis de ciclo de vida. Considerando estos antecedentes en el presente trabajo se hace una revisión de los aspectos tecnológicos relacionados a la producción de butanol a partir de fuentes lignocelulósicas y petroquímicas. Mediante revisión bibliométrica usando las bases datos Web of Science y Scopus la ecuación de búsqueda [*production SAME butanol SAME from SAME sugarcane SAME bagasse*] fueron identificadas las principales investigaciones en butanol. Luego se procesaron en el software VOSviewer 1.6.13 y se obtuvo un panorama global de las metodologías empleadas, evidenciado que la fermentación ABE es el método preferido para la producción de butanol, a partir de biomasa lignocelulósica. Adicionalmente se empleó el software Minitab 18 y se logró correlacionar la concentración inicial de azúcar respecto a los parámetros de rendimiento y productividad. Así, los mejores valores fueron 0,4 g/g y 0,4 g/L*h respectivamente. Los cuales fueron reportados por Da & et al en el 2019, para un pretratamiento químico con ácido sulfúrico para el bagazo de caña de azúcar y una suplementación de nutrientes en la solución de fermentación. Estos resultados comparados con etanol de segunda generación son mejores en rendimiento, pero no en productividad.

Palabras clave: Rendimiento, Productividad, Butanol, Software VOSviewer, Fermentación, Pretratamiento, Software Minitab.

ABSTRACT

Second generation butanol has taken great interest as biofuel, lignocellulosic biomass is a raw material with enormous potential as it is a renewable material and low cost, This is why the present study reviews the technological aspects related to the production of butanol from lignocellulosic and petrochemical sources. The bibliometric review was carried out using two databases subscribed to the Bibliographic Resources Management Division of the Cuaca University, which are Web of Science and Scopus, where the search equation was used: [production SAME butanol SAME from SAME sugarcane SAME bagasse] to identify the main investigations, which were processed in VOSviewer 1.6.13 software to generate a global overview of the methodologies used, from which ABE fermentation was obtained as the preferred method for the production of butanol from lignocellulosic biomass. Similarly, Minitab 18 software was used to obtain the correlation of the initial sugar with respect to performance and productivity parameters; from the dispersion graphs obtained in Minitab 18 software was able to identify that the methodology with the best values in performance and productivity (0.4 g/g and 0.4 g/L*h respectively) is the one described by Da & et al in 2019, with a chemical pretreatment with sulphuric acid for sugarcane bagasse and nutrient supplementation in the fermentation solution; finally, when comparing the yield and productivity values of butanol with second generation ethanol, it is observed that the methodology of Da & et al, has a good yield but a low productivity.

Keywords: Yield, Productivity, Butanol, VOSviewer Software, Fermentation, pretreatment, production, Minitab Software.

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha empleado los combustibles fósiles como medio energético para su desarrollo, el consumo mundial de energía se ha incrementado en el último siglo con el crecimiento de la población y la industrialización de los países, aumentando así la crisis ecológica, pues su combustión genera carbón, hidrógeno y otros compuestos (como los sulfuros) que contribuyen a la contaminación ambiental (Gonzalez, 2020). Es por ello que cada día toma importancia hacer un cambio a sistemas energéticos sustentables, en los cuales se aprovechen distintas fuentes energéticas como lo son los residuos de procesos agroindustriales, en los cuales encontramos los residuos de tipo lignocelulósico, ricos en polímeros de celulosa y hemicelulosa, los cuales se pueden degradar por procesos químicos, físicos y/o biológicos para obtener azúcares y posteriormente convertirlos en biocombustibles (Muñoz, Pantoja & Guatin, 2014).

Dentro del grupo de los biocombustibles se encuentra el butanol de segunda generación, producido a partir de bagazo de caña de azúcar por fermentación, este biocombustible presenta una diversidad de ventajas en comparación con el etanol. Entre ellas una densidad de energía un 30% más alta, menor viscosidad, solubilidad en agua y potencial corrosivo; además, el butanol se puede mezclar con gasolina en altas proporciones sin modificación o adaptación de los motores de los automóviles (Zetty & *et al*, 2021).

La caña de azúcar es un cultivo agrícola que se desarrolla en países tropicales y subtropicales del mundo, pertenece a la familia de las gramíneas y su nombre botánico es *Saccharum officinarum*. En Colombia la producción primaria de caña de azúcar se ubica en 30 municipios de Valle del Cauca, 5 de Caldas, 5 de Risaralda, 1 en Quindío y 9 de Cauca, su producción agroindustrial en azúcar se realiza en 12 ingenios con una capacidad de molienda instalada de 94.000 toneladas por día (MinAgricultura, 2020). Para el año 2018 según la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano "Agronet", la producción de caña de azúcar llegó a 28'786.636,45 toneladas, de las cuales el departamento del Cauca participó con el 15,79% que corresponde a 4'545.786,29 toneladas (MinAgricultura, 2018).

Después de la cosecha de la caña de azúcar esta es transportada a molinos para la extracción de su jugo, el cual se utiliza en la producción de azúcar. De la molienda se generan alrededor de 50 a 100 toneladas de residuos de bagazo de caña de azúcar. Estas cantidades indican el potencial del departamento del Cauca para la producción de biocombustibles de segunda generación, considerando que el bagazo de caña de azúcar es un residuo fibroso compuesto de 32-45% de celulosa y 20-32% de hemicelulosa, sustancias que mediante tratamientos de tipo físico-químicos y térmicos se desdoblaron a azúcares reductores de 5 y 6 carbonos

(glucosa, xilosa, manosa, arabinosa) para la producción de butanol (Alokika & *et al.*, 2020).

A pesar que los residuos de caña de azúcar se pueden emplear en la producción de butanol existen diversas limitaciones de tipo tecnológico, científico, evaluaciones económicas y ambientales para su producción. La investigación respecto a rendimientos y productividad de butanol respecto a un tipo de materia prima particular por ejemplo cogollos y hojas de caña de azúcar es escasa, por esta razón el presente trabajo se busca desarrollar una revisión de los aspectos tecnológicos relacionados a la producción de butanol a partir de fuentes lignocelulósicas y químicas, mediante las tecnologías empleadas a partir de residuos de cosecha de caña de azúcar y los aspectos tecnológicos a partir de compuestos químicos; y finalmente evaluar los rendimientos y la productividad de la obtención de butanol a partir de los residuos de cosecha de caña.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 BIOMASA LIGNOCELULÓSICA Y BIOCOMBUSTIBLE

1.1.1 Concepto y orígenes. La biomasa o material lignocelulósico es generada a partir del proceso de fotosíntesis que implica la combinación de CO_2 y H_2O utilizando la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar como fuente de energía, los productos primarios de este proceso son azúcares con la subsecuente producción de O_2 como subproducto (Chávez, 2020). Esta biomasa vegetal está compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, se excluyen en este caso la biomasa constituida principalmente por almidón, proteínas y azúcares, como son los casos de los granos, cereales, mieles y otros. La biomasa de origen lignocelulósico, es el material orgánico más abundante en la tierra, sus fuentes son los bosques, cultivos agrícolas, residuos de cosechas y otros residuos industriales como residuos de la industria de la madera y los tableros, residuos de la industria del papel y el papel reciclado (Hernández, 2017).

Las primeras aplicaciones de la biomasa de origen lignocelulósico fueron como combustible, la construcción y alimento animal fundamentalmente. Hoy, sus aplicaciones son muy amplias y constituyen la base de muchas industrias como la de la celulosa y papel, fuente de obtención de productos químicos, materiales de construcción, combustibles líquidos y gaseosos y muchas más. Los materiales lignocelulósicos, tienen la ventaja de ser biodegradables, y renovables, siendo el resultado del proceso de fotosíntesis de los vegetales mediante la energía solar; bajo este enfoque, su empleo como combustibles representa una forma sostenible y amigable con el medio ambiente de aprovechamiento de la energía solar (Hernández, 2017).

Los biocombustibles datan de 1895, con la idea de usar aceites vegetales como combustible para motores de combustión interna, en ese año el Dr. Rudolf Diesel desarrollo el primer motor Diesel cuyo prototipo ya estaba previsto que funcionara con aceite vegetales como el aceite de maní. Los biocombustibles son aquellos combustibles que se obtienen de biomasa, en la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de materia orgánica formada por vía biológica (Gonzalez, 2020).

1.1.2 Clasificación de biomasa y biocombustibles. La biomasa es el conjunto de materia orgánica renovable, es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico. Se puede clasificar en dos tipos según su composición y origen (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

Según se composición se clasifican en:

- Oleaginosa: Aquella biomasa que contiene lípidos como sustancia bioorgánica, entre ellos las semillas de girasol, soja, maíz, lino y almendro (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- Alcohólica: Contiene como sustancia bioorgánica monosacáridos (Glucosa y fructosa) y disacáridos (Sacarosa) entre ellos las pulpas de fruta, caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- Amilácea: También conocida como Inulínica, contiene polisacáridos (Insulina y almidón), en este grupo se encuentran los tubérculos de patata y rizomas de Dalia y los granos de cereal, entre otros (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- Lignocelulósica: Su sustancia bioorgánica son los polisacáridos (Hemicelulosa y celulosa), sus fuentes son las maderas en general y los residuos lignocelulósicos (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

Según su origen en:

- Natural: Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana. Su explotación, en general, no es interesante por razones económicas, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vía de desarrollo (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- Residual: Consiste en la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- Cultivo energético: Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas alimenticios, los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa, y no de calidad, y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo, y por lo tanto el precio de la biomasa final (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

Los biocombustibles se pueden clasificar de diferentes formas atendiendo a diversas características, entre ellas las siguientes.

Según su estado:

- **Sólido:** Se considera biocombustible sólido aquel combustible sólido, no fósil, compuesto por materia orgánica de origen vegetal, animal, o producido a partir de la misma mediante procesos físicos, susceptible de ser utilizado en aplicaciones energéticas, engloba desde los cultivos agrícolas hasta los residuos producidos en industrias agroalimentarias o forestales (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- **Líquido:** Los biocombustibles líquidos (aceites y alcoholes) son una serie de productos de origen biológico que pueden sustituir a los derivados del petróleo, o bien pueden ser utilizados como aditivos para estos en los motores. El nombre hace referencia a los combustibles líquidos que proceden de materias primas producidas en el sector agrícola y que han sido transformadas hasta conseguir unas propiedades similares a las de los combustibles tradicionales. También se les denomina biocarburantes porque su uso energético se destina al transporte (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- **Gaseoso:** Son aquellos obtenidos del proceso de digestión anaerobia que ocurre de forma espontánea en la naturaleza, degradando la materia orgánica y produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos, o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

Según su generación:

- **Primera generación:** Consiste en biocombustibles obtenidos a partir de cultivos agrícolas alimentarios, por lo que han sido muy polémicos, la problemática social de esta generación de biocombustibles reside básicamente en la subida desmesurada de los productos agrarios como consecuencia del aumento de su demanda; esta generación también presenta daños ambientales provocados por la deforestación principalmente de selvas tropicales (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- **Segunda generación:** La elaboración de los biocombustibles se basa a partir de los residuos de cultivos comestibles o en los residuos de las industrias agroalimentarias, también se consideran biocombustibles de segunda generación aquellos que se obtienen a partir de cultivos agro-forestales no destinados a la alimentación (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).
- **Tercera generación:** Son aquellos que en su elaboración utiliza metodologías de producción similar a los de segunda generación, pero empleando como materia prima bioenergéticos especialmente diseñados o adaptados para mejorar la conversión de la biomasa a biocombustible; estas mejoras o adaptaciones

utilizan frecuentemente técnicas de biología molecular (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

- Cuarta generación: Estos biocombustibles buscan la adaptación de la materia prima a mejorar la eficiencia en la captación y almacenamiento de CO₂, estos biocombustibles aun no son comerciales, aunque se encuentran plantas piloto en Brasil y EEUU (Trejo, García & Gutiérrez, 2019).

1.2 BUTANOL

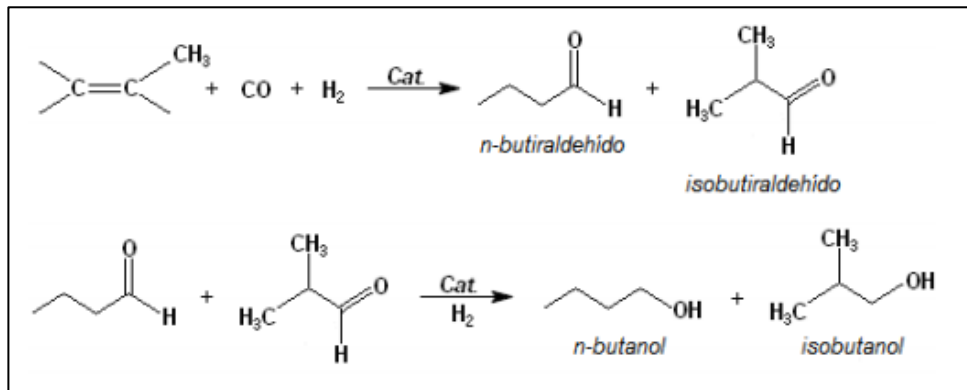
El butanol (alcohol butílico o 1-butanol) es un alcohol primario constituido por 4 carbonos cuya fórmula es C₄H₁₀O; es un líquido incoloro, flamable, con un olor característico, su vapor irrita las membranas mucosas produciendo un efecto narcótico a altas concentraciones. Hasta hoy, el butanol es considerado una mejor alternativa que el etanol como biocombustible ya que es menos corrosivo y menos soluble en agua que el etanol, siendo un combustible más adecuado para las máquinas de combustión interna utilizadas actualmente en los automóviles. Es menos contaminante que la gasolina y es competitivo en precio, se produce a partir de biomasa no alimenticias o biomasa tradicionales, puede emplearse para usos químicos y como combustible. Las propiedades del butanol en condiciones normales punto de ebullición de 118 °C, punto de fusión de -89 °C, densidad de 0.816 g/m³, poder calorífico inferior (PCI) de 34 MJ/kg, densidad energética de 29.2 MJ/L y calor de vaporización de 0.43 MJ/kg, lo hace superior al etanol, estable, seguro en el manejo y transporte, no se hidrata (solubilidad del 8%), menor tasa de evaporación y contaminación ambiental. Adicionalmente el mayor contenido energético, mejor solubilidad con la gasolina y superior viscosidad, lo hace atractivo para múltiples aplicaciones como lubricante, precursor de monómeros, ésteres, éteres, lacas, disolvente de pinturas, lacas, barnices. Las características mencionadas se deben al mayor número de átomos de carbono en la molécula del butanol (cuatro contra dos). También, al ser menos polar y tener menos afinidad química por su cadena más larga de carbono, lo hace menos afín con el agua (Da Silva Trindade & Dos Santos, 2018).

1.2.1 Rutas de síntesis químicas. El método más usado para la obtención de butanol es la hidroformilación o proceso OXO, es un proceso químico que consiste en la adición de hidrógeno y un grupo formil a un doble enlace carbono-carbono, obteniendo los aldehídos correspondientes con un carbono más que la oleofina de partida; este proceso fue descubierto en 1938 por Otto Roelen, durante el desarrollo del proceso Fischer-Tropsch. Actualmente, la hidroformilación es uno de los procesos industriales más importantes entre los que utilizan complejos metálicos de metales de transición en fase homogénea como catalizadores (Da

Silva Trindade & Dos Santos, 2018).

La producción de butanol consiste en reacciones sucesivas, que se inician con la hidroformilación del propileno (proceso químico que agrega un grupo formilo y un átomo de hidrógeno a un alqueno para formar un aldehído) con monóxido de carbono e hidrogeno sobre catalizadores de cobalto o rodio a alta presión, obteniéndose *n*-butiraldehído e isobutiraldehído. Seguidamente a la hidroformilación, se realiza una hidrogenación sobre catalizador de níquel, para obtener una mezcla de butanol e isobutanol; el proceso tiende a formar principalmente productos de cadena recta, que puede acentuarse por modificaciones en las condiciones de reacción (Da Silva Trindade & Dos Santos, 2018).

Figura 1. Ruta química de obtención de butanol



Fuente: Sanz, 2016

1.2.2 Rutas de síntesis biotecnológicas. La ruta de síntesis que más se emplea industrialmente es la fermentación Acetona-Butanol-Etanol (ABE) empleando diversos tipos de bacterias, entre ellas el género *Clostridia* especie *acetobutylicum*, estas bacterias presentan mayor potencial para la producción eficiente del butanol. Esta fermentación se desarrolla en dos fases, la fase acidogénica y la solventogénica, el paso estas fases depende fuertemente del pH del medio y de la concentración de metabolitos (específicamente ácido acético y butírico); cuando las condiciones son favorables para el crecimiento celular las bacterias producen ácidos para generar la máxima cantidad de energía, por ello el pH baja y la fermentación tiende a estar en fase acidogénica, después en la etapa de solventogénesis el pH del sistema se incrementa y las células alcanzan la fase estacionaria de su crecimiento, esta etapa está acompañada de la esporulación, transformando metabólicamente algunos de los ácidos formados en butanol, acetona y etanol (Ceba, 2018).

1.3 BIBLIOMETRÍA

Se define el concepto de bibliometría y se describen los parámetros que permiten hacer la evaluación integral de la información que ha sido acuñada en bases de datos, respecto a la investigación que puede ser de un tema específico, en este caso en butanol.

La palabra “bibliometría” deriva de los vocablos griegos biblos: ‘libro’, y metron: ‘medir’. Es la aplicación de las matemáticas y el método estadístico a la publicación de los resultados de la investigación científica; dicho de otra manera, es la aplicación de tratamientos cuantitativos a la comunicación escrita, producto tangible de la investigación. La bibliometría parte de la necesidad de cuantificar ciertos aspectos de la ciencia para poder comparar, medir y objetivar la actividad científica (Cascón & *et al*, 2020).

En 1969 Alan Pritchard fue el primero en definir Bibliometrics (bibliometría), como la aplicación de los métodos estadísticos y matemáticos para definir los procesos de la comunicación escrita, la naturaleza y el desarrollo de las disciplinas científicas mediante técnicas de recuento y análisis de la comunicación, la bibliometría tiene muchas definiciones, acuñadas por varios autores a través del tiempo, pero algo en común y necesario es la aplicación del método estadístico, de procedimientos matemáticos para tener resultados medibles de la producción científica (Cascón & *et al*, 2020).

1.3.1 Análisis bibliométrico. El análisis bibliométrico es una técnica de investigación validada en múltiples campos como los negocios, nuevas tecnologías, elección pública o la infometría; este tipo de análisis permite identificar tendencias en el conocimiento a través de la aplicación de técnicas cuantitativas que enriquecen, entre otras fases de la investigación, la revisión bibliográfica. El diseño metodológico parte de un ejercicio bibliométrico donde se analizan los contenidos a través de palabras clave, resúmenes y títulos que permiten identificar los principales factores en la innovación en la industria (Pineda, 2015).

1.3.2 Base de datos y Software VOSviewer. El término base de datos surgió en 1963, en la informática una base de datos consiste en una colección de datos interrelacionados y un conjunto de programas para acceder a dichos datos, en otras palabras, es un conjunto de información (un conjunto de datos) relacionada que se encuentra agrupada o estructurada. También se le conoce como un conjunto exhaustivo de datos estructurados, fiables y homogéneos, organizados

independientemente de su utilización y de su implementación en máquina, accesible en tiempo real, compartibles por usuarios concurrentes que tienen necesidades de información diferentes y no predecibles en el tiempo (Rueda, 2021).

El software VOSviewer es una herramienta para representar mapas, fue desarrollado por el centro de estudios de ciencia y tecnología de la universidad de Leiden y permite la construcción y visualización de las redes bibliométricas, con respecto a la creación de mapas basados en datos de red, se puede construir una red o crear un mapa que ya está disponible. VOSviewer puede ser utilizado para construir redes de publicaciones científicas, revistas científicas, investigadores, organizaciones de investigación, países, palabras clave o términos; los elementos de estas redes se pueden conectar por medio de enlaces de coautoría, coocurrencia, cita, acoplamiento bibliográfico o co-citación. Además, Permite utilizar datos de archivos Web of Science, Scopus, PubMed, RIS o Crossref JSON (Vences & *et al*, 2022).

1.3.3 Indicador bibliométrico. Un indicador bibliométrico se define como los parámetros que se utilizan en el proceso evaluativo de cualquier actividad. Normalmente, se emplea un conjunto de ellos, cada uno de los cuales pone de relieve una faceta del objeto de la evaluación. Esto se hace evidente en el caso de la ciencia, que, al ser multidimensional, no podrá valorarse con un indicador simple. Los indicadores bibliométricos se basan en el análisis estadístico de los datos cuantitativos proporcionados por la literatura científica y técnica. Se emplean, en una parte para analizar el tamaño, crecimiento y distribución de la bibliografía científica (libros, revistas, patentes, etc.), a fin de mejorar las actividades de información, documentación y comunicación científica, y de otra parte, para analizar los procesos de generación, propagación y uso de la literatura científica y llegar a conocer los mecanismos de la investigación científica considerada como actividad social, así como de la estructura y dinámica de los colectivos de investigadores que producen y utilizan dicha literatura (Ladino, 2021).

Los indicadores bibliométricos son instrumentos para medir las producciones científicas y permiten analizar el impacto que causa un trabajo científico, dependiendo de la literatura citada, ya que evalúan, determinan y proporcionan información sobre los resultados del crecimiento en el proceso investigativo en cualquier campo de la ciencia; su uso se apoya en la difusión de los nuevos conocimientos de las publicaciones. Los indicadores pueden establecer el crecimiento teniendo en cuenta la cantidad de trabajos publicados, colaboración de autores, centros de investigación, impacto de las comunicaciones, países, instituciones, entre otros. Así se puede valorar la calidad de la actividad científica, y la influencia tanto del trabajo como de las fuentes (Escorcía, 2008). De acuerdo con ello, los indicadores bibliométricos relevantes en la investigación son:

El Índice de productividad personal, es muy utilizado en la productividad y se mide a través del número de publicaciones por investigador, institución, grupo y se rige por la ley de Lotka debido a que se aplica como instrumento para la descripción de las áreas temáticas y es definido como el logaritmo decimal del número de artículos realizados (Escorcía, 2008).

$$IP = \text{Log}(N) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ecuación donde IP es el indicador de productividad personal y N es el número de artículos. Este índice también sirve para obtener el índice de transitoriedad, definido como el porcentaje que tiene un conjunto determinado de publicaciones correspondientes a autores transitorios (Escorcía, 2008).

La ley de Lotka es originalmente propuesta por Lotka en 1926, expresa la distribución de frecuencias de la productividad científica por el número de artículos publicados, también conocida como “ley del cuadrado inverso de la producción científica”. Analiza el volumen de publicación de los autores y encontró que el número de autores que publican menos artículos es mayor que los que publican muchos, en términos matemáticos, (Ruiz, Álvarez & Povedano, 2020) la ley original se expresa mediante la ecuación 2:

$$A(n) = \frac{A(1)}{n^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde $A(n)$ es el número de autores que publican n artículos y $A(1)$ el número de autores que publican un solo artículo.

El índice H , fue creado en el 2005 por Jorge Hirsch, profesor de física de la universidad de California. Permite evaluar la producción en un área temática a nivel de países, revistas, instituciones o autores. En un principio se conceptualizó para la evaluación individual pero poco tiempo después fue adaptado para la evaluación de niveles de agregación más amplios. Desde que se inventó, el índice H es uno de los más conocidos y usados indicadores bibliométricos, después del conocido factor de impacto de Eugene Garfield. El éxito de este índice está relacionado con la facilidad con que puede calcularse y adaptarse a diferentes niveles de agregación y con su robustez, ya que tanto el aumento desproporcionado de citas de un solo artículo, como el aumento del número de artículos no tiene un efecto inmediato en el índice. Además, aunque tiende a valorar un esfuerzo científico prolongado puede ser adaptado para evaluar determinados periodos de tiempo (Málaga, 2014).

Para estimar la importancia de los autores se ha utilizado el índice h obtenido de las bases de datos, este indicador se utiliza para estimar el número de artículos relevantes publicados por un autor; cuanto mayor sea el número de artículos, mayor será el valor del autor. Este indicador es fácil de usar y es el único que

combina producción e impacto; además, elimina los sesgos causados por las colas de distribución de citas (Ruiz, Álvarez & Povedano, 2020).

El Índice de colaboración entre investigadores tiene un efecto positivo sobre la producción científica, el grado de colaboración ha variado a través de los años y según la disciplina desempeñada, observándose un aumento notable en la colaboración científica y en mayor proporción en aquellas materias de carácter científico que en las ciencias sociales y humanidades. Los estudios sobre la colaboración científica tienen una alta presencia en las investigaciones de tipo bibliométrico y suelen ser utilizados como medida de colaboración científica entre varios autores y permite determinar el tamaño de los grupos de investigación (Escorcia, 2008).

Este índice es el resultado de dividir el número de autores participantes en todos los trabajos presentados por un centro o publicados en una determinada revista, dividido por el número de artículos, y se puede calcular también, diferenciado entre firmas internas o locales y externas o de otras instituciones (Rueda-Clausen, Villa-Roel, y Rueda-Clausen, 2005).

$$IC = \frac{ji}{ni} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde IC es el índice de colaboración, ji es el número de autores participantes en los trabajos, y ni es el número de artículos.

El factor de impacto (FI) es un indicador que fue desarrollado en el Instituto de Información Científica en su publicación anual de la sección Journal Citation Reports (JCR) del Science Citation Index (SCI), es un indicador que se aplica a las revistas y permite evaluar y comparar la importancia de la misma frente a otras de su mismo campo. Este se calcula como el cociente entre el número de citas a artículos de dicha revista y el número total de artículos publicados, tomados solo la suma de los valores de los últimos años (Rueda-Clausen, Villa-Roel, y Rueda-Clausen, 2005).

$$FI = \frac{\text{Número de citas realizadas}}{\text{Número total de artículos}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

1.4 PARÁMETRO DE PROCESO

1.4.1 Rendimiento. Se puede expresar como fracción o como porcentaje. Es la relación entre los moles de producto deseado que se obtienen, sobre los moles que se hubieran obtenido si todo el reactivo límite reaccionara sin que existieran reacciones secundarias. Es el máximo teórico de producto deseado. Implica un

100% de conversión del reactivo límite y solo la reacción principal (Sandoval, 2021). Para fines de este estudio el rendimiento será determinado como la cantidad de butanol producido (g) por glucosa consumida (g) (Quezada, 2016).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad de butanol}}{\text{Glucosa consumida}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

1.4.2 Productividad. Una definición simplista de productividad puede ser simplemente el lograr obtener más por menos, la productividad puede definirse como la relación entre la cantidad de bienes y servicios producidos y la cantidad de recursos utilizados, es un indicador que refleja el uso de los recursos de una economía en la producción de bienes y servicios. La productividad no es una medida de la producción ni de la cantidad que se ha fabricado, si no de la eficiencia con la que se han combinado y utilizado los recursos para lograr los resultados específicos deseables (Quezada, 2016). Para fines de este estudio la productividad está definida como la cantidad de butanol producido (g) dividida por el tiempo de fermentación (h) y un volumen de fermentación (L).

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Cantidad de butanol}}{\text{Tiempo} * \text{Volumen de fermentación}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

2. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la revisión bibliográfica de los aspectos relacionados a las tecnologías, producción, productividad y rendimientos de butanol.

2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Ecuación de búsqueda. Para la búsqueda de los residuos lignocelulósicos empleados para la obtención de butanol se empleó la ecuación de búsqueda (*production SAME butanol SAME lignocellulosic SAME residues*), donde la etiqueta del campo es Tema, campo en el cual se buscan artículos que contengan la ecuación en sus títulos, resumen y palabras clave del autor, cabe destacar que la ecuación se encuentra en el idioma inglés debido a que la indexación de los artículos en las bases se presentan en este idioma, además el conector empleado en la ecuación es “SAME” esto ya que permite que la expresión se limite a presentar artículos que incluyen todas las palabras en el mismo campo; así mismo para la búsqueda específica del residuo lignocelulósico a emplear, se utilizó la ecuación de búsqueda (*production SAME butanol SAME from SAME sugarcane SAME bagasse*) cuyos resultados daban a conocer las tecnologías empleadas en la obtención de butanol por la ruta de síntesis biotecnología a partir de residuos de caña de azúcar, específicamente bagazo.

2.1.2 Identificación y selección de información. A partir del desarrollo de las ecuaciones de búsqueda, se realizó una filtración bibliográfica en dos bases de datos principalmente, las cuales fueron Scopus y Web of Science, bases de datos suscritas a la División de Gestión de Recursos Bibliográficos de la Universidad del Cauca, para identificar los principales residuos lignocelulósicos y las diversas tecnologías empleadas en la obtención de butanol; de acuerdo a que con las ecuaciones de búsquedas los artículos filtrados no superaron más de 100 resultados, se decidió trabajar con todos los resultados sin aplicar una nueva filtración manual.

2.1.3 Evaluación de información mediante software VOSviewer. De acuerdo a la identificación y selección de información de las bases de datos, se obtuvo un formato de cada plataforma siguiendo las recomendaciones del manual del VOSviewer, los cuales contienen la información filtrada a partir de la ecuación de búsqueda para realizar las redes de co-ocurrencia de palabras, coautoría de instituciones, acoplamiento bibliográfico de los países y de los autores.

En base a las ecuaciones de búsqueda se obtuvieron archivos con extensiones de información tipo “CSV” para Scopus y “TXT” para Web of Science, los cuales se emplearon para realizar las visualizaciones en el Software VOSviewer versión 1.6.13, para la primera parte sobre los residuos lignocelulósicos más utilizados solo se realizaron visualizaciones de las palabras clave relacionadas con biomasa o residuos para ambas bases de datos.

Al igual para las diversas tecnologías de obtención de butanol a partir de bagazo de caña de azúcar, se realizaron varias representaciones y visualizaciones de las redes, entre ellas co-ocurrencia de palabras, coautoría de instituciones y acoplamiento bibliográfico de países y autores. Cada red se presenta en visualizaciones que pueden variar entre visualización de red, visualización de superposición (la cual presenta la relación de las investigaciones con el tiempo) y visualización de densidad, además se presentan tablas con un objeto de interés que componen los clústeres o grupos de cada red.

2.2 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

2.2.1 Selección de indicadores bibliométricos. Debido a que se requiere conocer la calidad y la influencia de la actividad científica de los artículos obtenidos de las filtraciones realizadas en las bases de datos Scopus y Web of Science, se eligieron diversos indicadores bibliométricos que limitaran la investigación acerca de los rendimientos y la productividad de butanol a partir de biomasa lignocelulósica. Los indicadores seleccionados son: el índice de productividad personal; índice H para: los autores con mayor índice de productividad personal en las dos bases de datos y los artículos de la ecuación de búsqueda en las dos bases de datos; índice de colaboración y factor de impacto.

2.2.2 Análisis de los indicadores bibliométricos. A partir de los indicadores bibliométricos elegidos, se analizara el comportamiento bibliográfico citado de los diferentes artículos de las dos bases de datos, los cuales están relacionados con la obtención de butanol a partir de biomasa lignocelulósica.

2.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE BUTANOL

2.3.1 Análisis de los parámetros de rendimiento. Los valores del rendimiento se calcularon a partir de la ecuación 5, la cual relaciona la cantidad de butanol producida con la cantidad de glucosa consumida en la fermentación, esta ecuación se aplicó a los artículos más relevantes sobre la producción de butanol a

partir de biomasa lignocelulósica obtenidos de la ecuación de búsqueda.

2.3.2 Análisis del parámetro de productividad. Los valores de la productividad se calcularon a partir de la ecuación 6, la cual relaciona la cantidad de butanol producida con el tiempo y el volumen de fermentación, esta ecuación se aplicó a los artículos más relevantes sobre la producción de butanol a partir de biomasa lignocelulósica obtenidos de la ecuación de búsqueda.

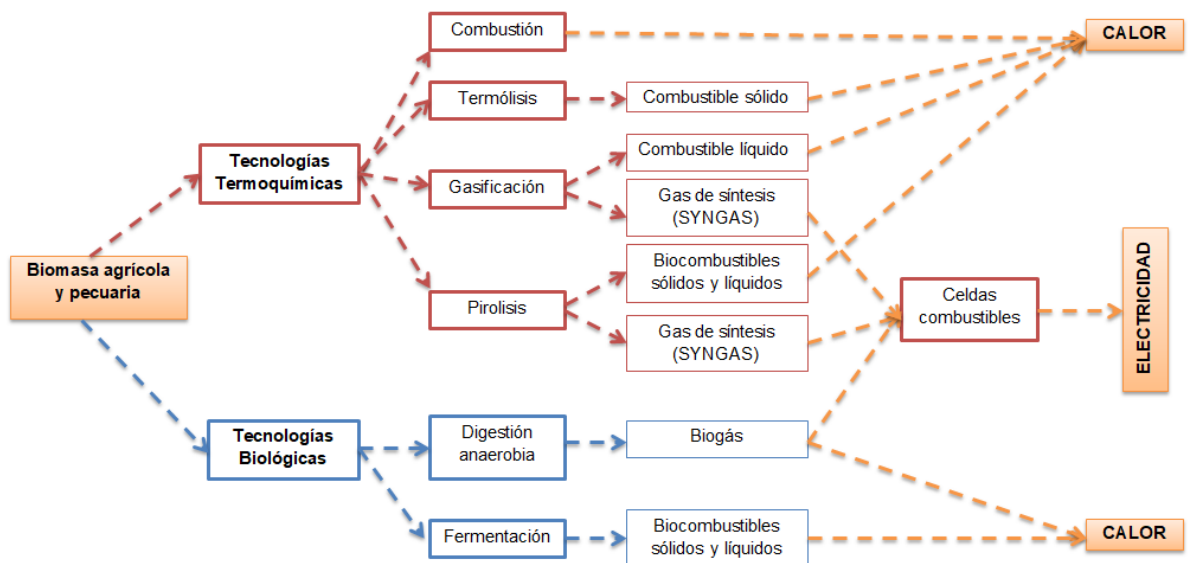
2.3.3 Evaluación conjunta de parámetros. Con la información obtenida del análisis de los parámetros de rendimiento y productividad, se evaluó cuales investigaciones poseían los mejores y los peores valores en los parámetros, para relacionar la influencia que tiene las condiciones de las fermentaciones en los valores finales de la obtención de butanol. Se empleó el software estadístico Minitab 18, para desarrollar la correlación de Pearson y las gráficas de dispersión, además se obtuvieron los valores P y el coeficiente de variación de los parámetros. Finalmente se realizó una comparación de los valores del rendimiento y la productividad del butanol con las descritas para el etanol obtenido a partir de bagazo de caña de azúcar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BUTANOL

3.1.1 Tecnologías de transformación de biomasa en energía. La biomasa es la única fuente energética renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, mediante procesos de conversión térmicos y biológicos; en comparación con los combustibles fósiles la biomasa posee un contenido energético menor, debido a que esta tiene una mayor relación de oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono, y la cantidad de energía generalmente se almacena en las cadenas carbono-carbono (Ministerio de Minas y Energía, 2011).

Figura 2. Tecnologías de transformación energética de biomasa



Fuente: Adaptación Ministerio de Minas y Energía, 2011

Dentro de las tecnologías empleadas para la transformación de biomasa en energía encontramos dos grandes grupos como se observa en la figura 2, las cuales son las tecnologías termoquímicas y biológicas; en la tecnología termoquímica se emplea biomasa de origen agrícola o pecuaria, la cual pasa por diversos procesos para su conversión a coproductos energéticos (ver figura 2); las tecnologías termoquímicas se realizan en condiciones controladas de temperatura y presión, condiciones en las que la estructura de la materia se rompe en compuestos de diferente estado (gaseoso, líquido y sólido) dependiendo de su posterior aplicación, estas tecnologías las conforman la combustión, termólisis, gasificación y pirólisis (Ministerio de Minas y Energía, 2011).

La combustión es el proceso más sencillo y más ampliamente utilizado, permite la obtención de energía térmica de uso doméstico e industrial, donde la biomasa se transforma en gases calientes, con temperaturas alrededor de 800-1000°C, al aplicar una energía térmica elevada en presencia de oxígeno, en la práctica sólo es posible combustionar biomasa con una humedad inferior al 50%. La co-combustión en las centrales eléctricas de la biomasa junto al carbón, es una opción atractiva debido a su alta eficiencia de conversión en energía. A pesar de ello, la combustión no se considera un proceso de conversión adecuado ya que no produce combustibles que puedan ser posteriormente utilizados como los bioaceites o el biogás (Urien, 2013).

Por otro lado, el principio de la termólisis es la reducción por efecto combinado de la presión y la temperatura debidamente controladas de moléculas orgánicas complejas a otras más simples, como carbono, hidrógeno, biogás o hidrocarburos ligeros y aromáticos. La termólisis es un proceso similar al de pirólisis, sin embargo, existen diferencias significativas entre ellas, pues la termólisis consiste en la degradación-disociación térmica de materiales a temperaturas bajas con una total ausencia de oxígeno, de tal forma que el contacto entre la fuente de calor y el producto a termolizar es indirecto (López, 2016).

La gasificación es el proceso en el cual ocurre la oxidación parcial de la biomasa con aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas (800-900 °C), dando lugar a un gas combustible. El poder calorífico del gas producido es de 4-6 MJ/Nm³ y puede ser quemado directamente o utilizado como combustible para motores de gas y turbinas. También, puede ser utilizado como gas de síntesis para la producción de productos químicos, como por ejemplo, el metanol. Un proceso prometedor, es la gasificación integrada en ciclo combinado (GICC) que permite convertir el combustible gaseoso, generado en la combustión, en electricidad con una eficiencia de conversión global elevada. Una de las ventajas de los sistemas GICC es que el gas se limpia antes de llegar a la turbina, lo que permite regular el caudal de gas que llega a la turbina y facilitar el funcionamiento de la misma (Urien, 2013).

La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustible con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Desde un punto de vista químico, la pirólisis es un proceso complejo, pues generalmente se lleva a cabo a través de una serie de reacciones en las que influyen muchos factores, como la estructura y composición de la materia prima, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo, entre otros (Urien, 2013).

El segundo grupo son las tecnologías biológicas, en el cual los bioprocesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismo para producir combustibles, estos procesos son los más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termoquímicos. Se

destaca el hecho que estos procesos se llevan a cabo a temperatura ambiente o cercana a ella, dentro estos procesos se destacan las transformaciones anaeróbicas y las fermentaciones alcohólicas (Ministerio de minas y energía, 2011).

La digestión anaerobia de la materia orgánica genera dos corrientes: en una un gas combustible con una concentración de metano superior al 60% y poder calorífico inferior al orden 5500 Kcal/m³, que se designan usualmente como biogás; y por otro lado un sólido conformado por residuos, cuya composición se asimila a un abono orgánico tipo compost (Ministerio de minas y energía, 2011).

La fermentación es la transformación de un azúcar en alcohol, ocurre de forma natural con varios alimentos y se ha empleado desde la antigüedad para perfeccionar tanto la conservación como las propiedades organolépticas de los alimentos; sin embargo, el término también se emplea en un sentido más extenso como el uso intencional de microorganismos tales como bacterias, levaduras y hongos para elaborar productos rentables a escala industrial. La fermentación por lo tanto es un proceso en ausencia de total o parcial de oxígeno donde carbohidratos o compuestos relacionados son oxidados para producir energía (Vásquez, 2019).

3.1.2 Tecnologías empleadas en la ruta de síntesis biotecnológica. La selección del tipo de aprovechamiento energético como las dificultades que se puedan presentar en cualquier tratamiento posterior, dependen de las propiedades fisicoquímicas, bioquímicas y energéticas del residuo (Ministerio de minas y energía, 2011). El bagazo de caña de azúcar, es un residuo fibroso que se obtiene tras el procesamiento industrial de la caña de azúcar, es un sustrato relevante para la obtención de coproductos valiosos debido a su alto contenido de polisacáridos, contiene entre 32-45% de celulosa, 20-32% de hemicelulosa, 17-32% de lignina, 1.0-9.0% de ceniza y algunos otros componentes, los azúcares estructurales del bagazo relacionados con la celulosa y la hemicelulosa, lo convierten en un sustrato potencial para la producción de biocombustibles, ácidos orgánicos, enzimas y otros productos de valor agregado (Alokika & *et al.*, 2020); en las tecnologías empleadas para la obtención de butanol en la ruta de síntesis biotecnológica se encuentran principalmente las fermentaciones ABE e IBE.

El butanol (una molécula de cuatro carbonos) pertenece a la misma familia que otros combustibles alcohólicos como el metanol y el etanol. Los átomos de carbono del butanol pueden formar una estructura de cadena lineal o estructuras ramificadas, definidas como isómeros. Los cuatro isómeros del butanol son n-butanol o 1-butanol, s-butanol o 2-butanol, iso-butanol y terc-butanol, los cuales tienen propiedades distintas. El n-butanol es la única estructura molecular de cadena lineal, suele ser el producto final de un proceso de fermentación ABE de fuentes renovables, conocido como biobutanol (Veza, Muhamad & Abdul, 2021).

El proceso de producción de butanol a partir de biomasa se conoce popularmente como fermentación acetona-butanol-etanol (ABE), este proceso fue inventado durante la Primera Guerra Mundial por Chaim Weizmann que trabajaba en la Universidad de Manchester. La industria de la fermentación ABE creció significativamente en la primera mitad del siglo XX, al final de la Segunda Guerra Mundial, aproximadamente el 66 % de butanol y una décima parte de la acetona en EE. UU se producían por fermentación y se empleó a escala industrial en todo el mundo desde principios del siglo XX hasta la década de 1970, antes de ser reemplazada por productos químicos a base de petróleo. Con el rápido crecimiento de la industria petroquímica después de la Segunda Guerra Mundial, grandes cantidades de acetona y butanol estaban disponibles a precios mucho más económicos que por la ruta basada en la fermentación, y esto esencialmente hizo que la fermentación ABE no fuera económica. A fines de la década de 1970, se cerraron casi todas las plantas industriales de fermentación ABE (Mayank, Ranjan & Moholkar, 2012).

La reactivación de la fermentación ABE está siendo estimulada actualmente por el potencial del butanol como biocombustible. Investigaciones han propuesto el butanol como aditivo de la gasolina, o incluso como reemplazo completo de la gasolina. El butanol es superior al etanol porque tiene un mayor contenido de energía, menor volatilidad, alto calor de vaporización (sin problemas de arranque en frío), menos corrosividad (fácil y mejor transporte) y baja solubilidad en agua, lo que reduce el potencial de contaminación de las aguas subterráneas (Mayank, Ranjan & Moholkar, 2012).

Dentro de la fermentación ABE se debe tener en cuenta diversos factores que afectaran la producción y el rendimiento de los productos en el proceso, tales como los microorganismos fermentativos empleados, los pretratamientos y desintoxicación de la materia prima, y la fermentación.

El butanol se produce a partir de microorganismos generalmente de las especies *Clostridium spp*, tales como *C. acetobutylicum*, *C. saccharobutylicum* y *C. beijerinckii*; los microorganismos clostridiales desempeñan un papel esencial en la fermentación ABE, al proporcionar energía para el crecimiento y la producción de los compuestos, estos microorganismos pueden digerir no solo el azúcar sino también el suero, el almidón, la celulosa y la lignina. Por lo tanto, el uso de *Clostridium* puede utilizarse no solo para biocombustibles de primera generación sino también para biocombustibles de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica (Veza, Muhamad & Abdul, 2021).

La lignina presente en el bagazo de la caña de azúcar, actúa como una barrera importante para la conversión efectiva de celulosa y hemicelulosa en varios azúcares monoméricos para la producción de biocombustibles. Por lo tanto, existe el requisito de una estrategia de pretratamiento adecuada que solubilice eficazmente la hemicelulosa y exponga la celulosa a las enzimas celulíticas; los

pretratamientos también disminuyen el tamaño de partícula, la polimerización y la cristalinidad de la celulosa, lo que resulta en un aumento de la superficie y la porosidad que promueve la digestibilidad enzimática de la biomasa. Por su estructura compleja, la lignina no tiene monómeros, siendo aprovechada, por ejemplo, como combustible en la cogeneración de energía eléctrica, como medio de generación de vapor en procesos que requieren calor, además puede ser considerada como un producto de interés para la biorrefinería del butanol. Los productos derivados de lignina: Combustibles (carburantes para aviones); BTX (benceno, tolueno, xilenos); Materiales poliméricos (resinas fenólicas, poliuretanos), aplicaciones electroquímicas (aplicaciones de almacenamiento de energía) y Fibras de carbono (Alokika & et al., 2020).

De la misma manera la desintoxicación es muy importante porque a menudo se generan sustancias tóxicas que inhiben en gran medida el crecimiento de bacterias, se encuentran disponibles diversos enfoques para pretratar residuos de cultivos ricos en celulosa y hemicelulosa, incluida la explosión de vapor y pretratamientos con ácidos diluidos como el ácido fosfórico o el ácido sulfúrico. La hidrólisis ácida especialmente cuando se usa ácido sulfúrico diluido, es un método de pretratamiento común y eficaz porque es simple y económico, generalmente la fracción de hemicelulosa del bagazo de caña de azúcar se puede hidrolizar a azúcares monoméricos mediante este método.

Sin embargo, los inhibidores microbianos producidos durante la hidrólisis ácida inhibirán el crecimiento microbiano durante la fermentación, suprimiendo así la eficiencia de la fermentación, se ha descubierto que tales compuestos inhibidores suprimen significativamente el crecimiento celular y la producción de butanol en *Clostridium beijerinckii*; los compuestos de furfural, hidroximetil furfural y fenólicos son los principales inhibidores de la fermentación; debido a sus toxicidades, es esencial eliminar los compuestos inhibidores de los hidrolizados antes de la fermentación del butanol. Un proceso de pretratamiento debe descomponer la fibra con una alta eficiencia, producir una cantidad suficiente de azúcar, prevenir la disipación de azúcar de la fracción deseada (es decir, fracción de pentosano) y limitar el grado en que el material pretratado inhibe el crecimiento de microorganismos durante la fermentación. (Su & et al., 2015).

Generalmente, si se utiliza un único método de pretratamiento para ayudar a limitar la producción de inhibidores, el sustrato no se descompondrá por completo y la producción de azúcar no será muy alta, por ello algunas investigaciones combinan varios métodos, en bagazo de caña de azúcar se ha diseñado un procedimiento de pretratamiento secuencial combinado de lignocelulosa (SCLPP) en el cual se incluyen la descomposición por microondas, hidrólisis enzimática, inmersión en amoníaco, descomposición microbiana y pretratamiento con agua caliente líquida para limitar la producción de inhibidores microbianos y obtener altos rendimientos de azúcar (Su & et al, 2015). Los pretratamientos se clasifican en físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos, los cuales tienen diversos

procesos para lograr su finalidad, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de pretratamientos hemicelulosa y celulosa

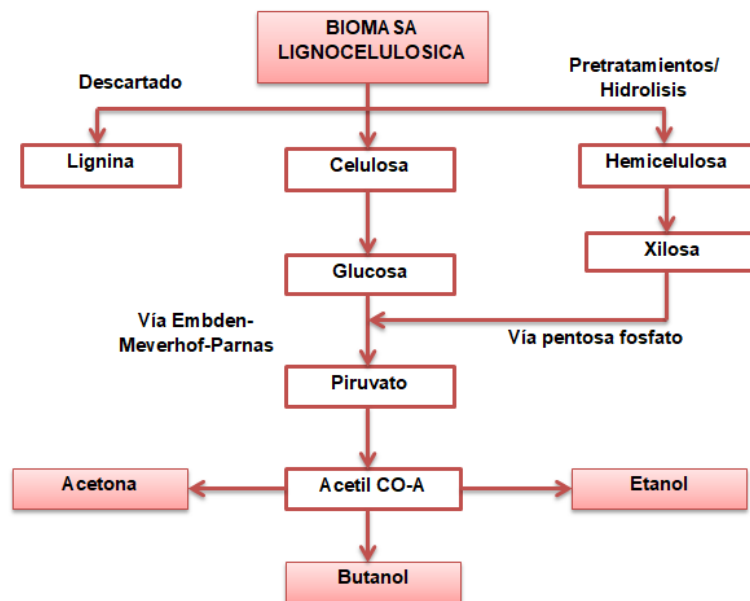
PRETRATAMIENTO		DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
FÍSICO	Mecánico	Reduce el tamaño de partícula de la biomasa para facilitar el manejo del material al aumentar la relación superficie/volumen, lo que resulta en una mejora de la producción de carbohidratos, el desarrollo de un tamaño de partículas significativo, la digestibilidad enzimática y la eficiencia de bioconversión sin formación de toxinas; este método se considera un pretratamiento físico eficiente y respetuoso con el medio ambiente.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Ultrasonido	Este pretratamiento implica la interrupción de la estructura de la pared celular para aumentar el área de superficie disponible de biomasa para la formación de fracción celulósica reactiva para azúcares fermentables, genera burbujas de cavitación en medios acuosos que promueven la disociación de las moléculas de agua en radicales libres, lo que resulta en la disociación del enlace de lignina y xilano. Las propiedades mecánicas de las ondas de ultrasonido degradan efectivamente la estructura orgánica del bagazo de caña de azúcar.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Microondas	Ha sido considerado como un método de irradiación no convencional que utiliza radiación electromagnética para disociar la composición estructural del bagazo de caña de azúcar. Este pretratamiento juega un papel importante en la distribución uniforme del calor en la biomasa, mientras que los métodos de calentamiento convencionales dan como resultado la generación de gradientes de temperatura. La polarización dieléctrica de este pretratamiento genera colisiones moleculares que disocian la estructura compleja del bagazo de caña de azúcar con alta eficiencia energética.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
QUÍMICO	Ácido	Generalmente adoptado por investigadores a escala comercial, e incluye ácidos diluidos (<10%) y concentrados (>10%) para el pretratamiento de bagazo de caña de azúcar, reduce el contenido de hemicelulosa y mejora la exposición de la celulosa para la acción enzimática; el pretratamiento con ácido diluido da una hidrólisis enzimática eficiente, así como un enfoque adecuado para formar xilooligosacáridos (XOS) a partir de bagazo de caña de azúcar.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Alcalino	El pretratamiento alcalino generalmente se realiza a temperaturas y presiones más bajas que incluyen NaOH, Ca(OH) ₂ y el pretratamiento con amoníaco para la posterior eliminación de la lignina, así como diferentes sustituciones relacionadas con el ácido urónico de la hemicelulosa presente en el bagazo de la caña de azúcar. Las condiciones alcalinas generalmente hinchan el bagazo que disminuye la cristalinidad de la celulosa para mejorar la digestibilidad enzimática.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Líquidos iónicos	Los líquidos iónicos son solventes no volátiles de alta estabilidad térmica, los cuales reducen la cristalinidad de la celulosa junto con la eliminación de la lignina hasta en un 60%. Se ha informado que el acetato de 1-etil-3-metilimidazolio ([Emim][Ac]) es un disolvente iónico eficaz para disolver la celulosa del bagazo de caña de azúcar. Los líquidos iónicos, que son sales de cationes y aniones de varios compuestos orgánicos, actúan como catalizadores para la eliminación de la lignina del bagazo de caña de azúcar.	Alokika & <i>et al</i> , 2020

Tabla 1. (Continuación)

PRETRATAMIENTO		DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
FISICOQUÍMICO	Explosión de vapor	La explosión de vapor es un enfoque de pretratamiento de bajo costo y respetuoso con el medio ambiente, incluye la exposición del bagazo a vapor de alta presión seguido de una descompresión explosiva, dando como resultado la hidrólisis y la solubilización de la hemicelulosa y la lignina, respectivamente. Por lo general, modifica la cristalinidad de la celulosa, así como el grado de polimerización, por lo que promueve la hidrólisis enzimática.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Organosolv	El pretratamiento organosolv ha sido considerado como una estrategia emergente debido a su capacidad de fraccionar el bagazo en sus constituyentes (celulosa, hemicelulosa y lignina) en forma relativamente pura con una recuperación y reciclaje efectivos del solvente respectivo. Este pretratamiento utiliza solvente orgánico con o sin catalizador, el solvente orgánico permite la recuperación de la mayor parte de la celulosa como sólidos, mientras que la mayor parte de la hemicelulosa y lignina se disuelven en estos solventes. Generalmente utiliza líquidos de punto de ebullición bajo (metanol, etanol) o alto (glicol o glicerol) en condiciones ácidas o no ácidas.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Agua caliente	El pretratamiento con agua caliente generalmente consume un gran volumen de agua a alta temperatura en el rango de 120 a 230°C durante 1 a 180 minutos, lo que resulta en la recuperación de 55 a 84% de hemicelulosa. Esta es una técnica de pretratamiento atractiva que utiliza presión ambiental a temperaturas elevadas, es decir, 160-240°C para mantener el agua en estado líquido y logra la digestibilidad enzimática teórica de la celulosa sin agregar ningún otro químico.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
	Explosión de fibra de amoníaco	La explosión de fibra de amoníaco (AFEX) es una estrategia de tipo explosión de vapor, generalmente utiliza amoníaco líquido para el pretratamiento a temperatura y presión relativamente altas, seguido de una reducción rápida de la presión después de un período de tiempo; este proceso disuelve efectivamente la hemicelulosa y reduce o despolimeriza la lignina, mejorando así la hidrólisis enzimática.	Alokika & <i>et al</i> , 2020
BIOLÓGICO		Posee un enfoque ecológico que mejora la accesibilidad enzimática de los polisacáridos como resultado de la deslignificación microbiana o enzimática. Este pretratamiento tiene como objetivo la selección de un microorganismo o enzima adecuado para que el proceso sea exitoso, ha ganado gran interés de los investigadores debido a la recuperación mejorada de productos de base biológica con sacarificación y fermentación mejoradas.	Alokika & <i>et al</i> , 2020

Con relación a la etapa de fermentación la temperatura óptima para la fermentación ABE oscila entre 30 y 40°C, las dos fases principales en la fermentación se caracterizan por: una fase de producción de ácido o acidogénesis, y una fase de producción de solvente o solventogénesis. El pH del caldo de fermentación, inicialmente de 6,8-7, disminuye a 4,5-5 durante la fase acidogénica. Esta fase está asociada con el rápido crecimiento de las células y la secreción de ácidos carboxílicos, acetato y butirato. El cambio de acidogénesis a solventogénesis ocurre a pH reducido. Esto podría ser consecuencia de la respuesta adaptativa de las células al bajo pH del medio o un pH bajo que desencadena la acción de enzimas solventogénicas (Mayank, Ranjan & Moholkar, 2012).

Figura 3. Vía metabólica de fermentación ABE



Fuente: Adaptación de Mayank, Ranjan & Moholkar; 2012

La figura 3 muestra la ruta metabólica de los cultivos de *Clostridium* a partir de una biomasa lignocelulósica como sustrato. Debido a la complejidad de la fracción de lignina dentro de la fermentación se suele descartar, las fracciones de celulosa y hemicelulosa sufren diversas reacciones para obtener los productos finales. La vía de Embden Meyerhof Parnas (EMP) metaboliza los azúcares de hexosa, mientras que los azúcares de pentosa pasan por la vía de la pentosa fosfato (PPP) para producir Piruvato.

Este compuesto sufre una serie de reacciones para producir Acetil-CoA, luego sigue tres vías separadas y simultáneas para producir ácido acético y ácido butírico, lo que lleva a la reducción del pH medio. Estos ácidos pueden penetrar la membrana celular y participan en la activación de la fase solventogénica para

producir acetona (a través de la formación de acetoacetyl-CoA), butanol (a través de la formación de butiril-CoA) y etanol (Mayank, Ranjan & Moholkar, 2012).

El proceso de fermentación ABE es inhibido por los productos obtenidos durante las fases de fermentación, es decir, acidogénesis y solventogénesis, después de que alcanzan un cierto nivel de concentración. El principal mecanismo subyacente a la inhibición es el aumento de la fluidez de la membrana celular en presencia de butanol que conduce a la desestabilización de la membrana. Para la mayoría de las cepas de *Clostridium* reportadas en la literatura, la concentración de inhibición de los solventes de acetona, butanol y etanol es de 20 g/L.

Lo anterior significa que el proceso de fermentación esencialmente cesa después de que la concentración de solvente alcanza este límite. Además de esto, el exceso de concentración de sustrato también puede provocar la inhibición de la fermentación; sin embargo, este problema se puede resolver manteniendo la concentración de sustrato por debajo del límite prescrito. En cuanto al tema de la inhibición por solventes o productos, una solución obvia está en términos de remoción continua de solventes en la fermentación para que su concentración no alcance el nivel de inhibición. Otro enfoque en esta materia es el del desarrollo de nuevas cepas de clostridios modificadas genéticamente que sean más resistentes y tolerantes al butanol (Mayank, Ranjan & Moholkar, 2012).

Algunas especies de clostridios solventogénicos producen isopropanol a diferencia de la acetona producida en la fermentación ABE, en lo que se denomina fermentación de isopropanol-butanol-etanol (IBE), aunque este proceso de fermentación se conoce con mayor frecuencia como IBE, recientemente se le ha llamado IB porque sus principales productos son isopropanol y butanol. La fermentación ABE e IB muestran un patrón bifásico, fases de acidogénesis y solventogénesis, en la fase de acidogénesis, las células crecen exponencialmente y generan ácidos butírico y acético, junto con hidrógeno y dióxido de carbono como productos principales; y en la fase posterior, llamada solventogénesis, que se acompaña del inicio de la esporulación, los ácidos se consumen parcialmente junto con los carbohidratos y se convierten en isopropanol, butanol y etanol (Rochón & *et al*, 2020).

La especies de microorganismos empleadas en esta fermentación pertenecen a los *Clostridium*, quienes producen en lugar de acetona isopropanol, el microorganismo más conocido como productor natural de IBE es el *Clostridium beijerinckii* DSM 6423. Los Clostridios productores de IBE son menos eficientes que sus homólogos productores de acetona-butanol-etanol (ABE), estos dos grupos de microorganismos se diferencian principalmente en su tolerancia al butanol (Rochón & *et al*, 2020), es por ello que para mejorar el rendimiento de la fermentación IBE, investigaciones han desarrollado nuevos microorganismos, entre ellas cepas productoras de ABE altamente tolerantes al butanol para producir IBE de manera más eficaz.

Además la productividad de los Clostridios productores de IBE naturales ha mejorado con la ayuda de la inmovilización celular y la recuperación de butanol in situ (Silva & *et al*, 2020). El desarrollo de hiperproductores de EBI ha sido más efectivo al transformar cepas hiperproductoras de ABE en productoras de EBI, la transformación consiste en insertar en los productores de EBI el gen (*sadh*) que codifica la enzima (alcohol deshidrogenasa primaria-secundaria, psADH) encargada de reducir la acetona a isopropanol en los productores de EBI, esta estrategia hasta ahora solo se ha aplicado a *C. acetobutylicum*; varias cepas de esta especie se utilizaron en plantas ABE y han sido el organismo modelo preferido en estudios de ingeniería metabólica de Clostridios solventogénicos desde principios de la década de 2000 (Ferreira & *et al*, 2019).

Los pretratamientos de bagazo de caña de azúcar para posterior fermentación IBE es poco estudiado, sin embargo estudios hablan sobre procedimientos como secado al aire libre bajo sombra hasta un contenido de humedad del 10%, tamizaje para seleccionar tamaños de partículas de bagazo menores de 3,35 mm (para usarse como vehículo de inmovilización celular), también se emplea el pretratamiento alcalino en las partículas de bagazo (Ferreira & *et al*, 2020).

Los equipos de fermentación han sido de gran interés para mejorar la fermentación IBE, los investigadores de la Universidad Aalto en Finlandia han logrado ganancias importantes en la productividad de IBE mediante el desarrollo de sistemas de inmovilización de células en reactores de columna continua que utilizan materiales renovables como portadores de células (por ejemplo, bagazo de caña de azúcar).

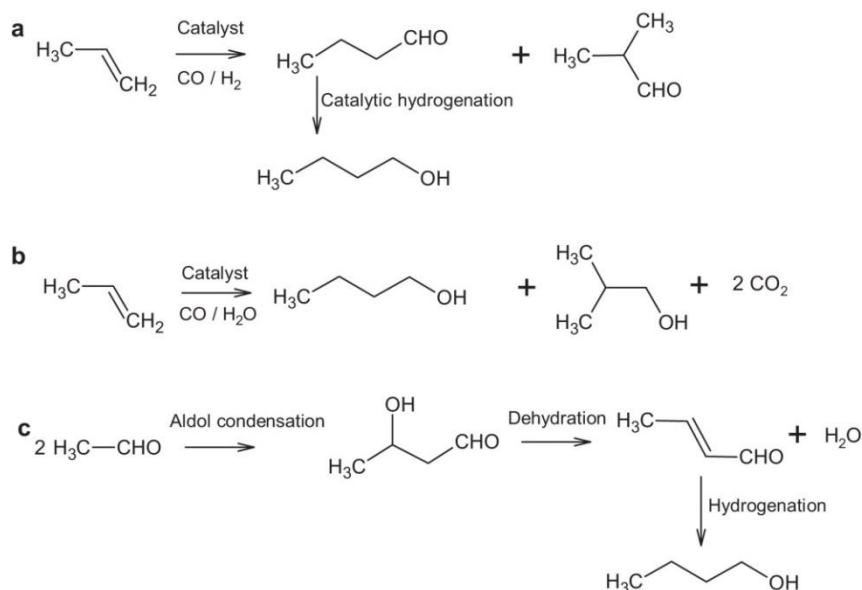
En cuanto a la recuperación integrada del producto, la investigación realizada en diferentes países se ha centrado en la extracción de gases y la extracción líquido-líquido para mejorar el título de IBE. Se han desarrollado diversas tecnologías para recuperar butanol durante la fermentación, ya que la carga de azúcar en la fermentación de Clostridios está dictada por la toxicidad del butanol, estas incluyen adsorción, pervaporación, extracción líquido-líquido, extracción de gas, fermentación al vacío, fermentación instantánea y extracción reactiva (Ferreira & *et al*, 2019).

3.1.3 Tecnologías empleadas en la ruta de síntesis química. La producción petroquímica del alcohol se basa en un primer paso en transformar una olefina en un aldehído, con un carbono más que la olefina, empleando como materias primas gas de síntesis y posteriormente producir el alcohol a partir del aldehído por medio de hidrogenación. Las principales vías de producción en dicho proceso vienen caracterizadas por los métodos y catalizadores escogidos para ello, en líneas generales se trata de una hidroformilación, hidrogenación y refinado (Bosch, 2019).

Para la producción química de n-butanol, existen tres procesos petroquímicos con

importancia industrial como se observa en la figura 4, la síntesis de oxo (a), la síntesis de Reppe (b) y la hidrogenación de crotonaldehído (c) (Uyttebroek, Van hecke, & Vanbroekhoven, 2015).

Figura 4. Producción petroquímica de n-butanol



Fuente: Uyttebroek, Van hecke, & Vanbroekhoven; 2015

El proceso más importante es la oxosíntesis, es decir, la hidroformilación del propeno, seguida de la hidrogenación de los aldehídos formados. El monóxido de carbono y el hidrógeno, se agregan al doble enlace Carbono Carbono en la fase líquida en presencia de catalizadores como Cobalto, Rodio o Rutenio, de lo cual se obtiene una mezcla de aldehídos isoméricos de 1-butanol y 2-metilpropanal, la hidrogenación catalítica de los aldehídos conduce a la formación de los correspondientes alcoholes. Hasta la década de 1970, a una alta presión de 20–30×10⁶ pascales a 100–180 °C en presencia de un cocatalizador, los resultados oscilaban alrededor del 75% de 1-butanol y el 25% de 2-metil-1-propanol (o isobutanol); los nuevos procesos a una presión más baja de 1–5×10⁶ pascales con Rodio como catalizador produjeron hasta un 95 % de 1-butanol y un 5 % de 2-metil-1-propanol (Uyttebroek, Van hecke, & Vanbroekhoven, 2015).

El butanol petroquímico se genera mayoritariamente a través del proceso oxo formando una mezcla de los productos, cuyos ratios dependen del catalizador y de las condiciones de operación, los catalizadores típicos utilizados en la hidrogenación del aldehído pueden estar basados en platino, paladio, níquel, rutenio, Raney cobalto o Raney níquel, los catalizadores porosos de cobalto y Raney, son perfectos para la hidrogenación. La hidrogenación se lleva a cabo generalmente bajo condiciones de carga de entre el 2 y 20 % en peso del catalizador en la alimentación, se debe contener una cantidad máxima de agua del

6% en peso de la disolución total y el tiempo de residencia con el que se debe trabajar en la hidrogenación comprende entre 10 y 120 minutos (Bosch, 2019).

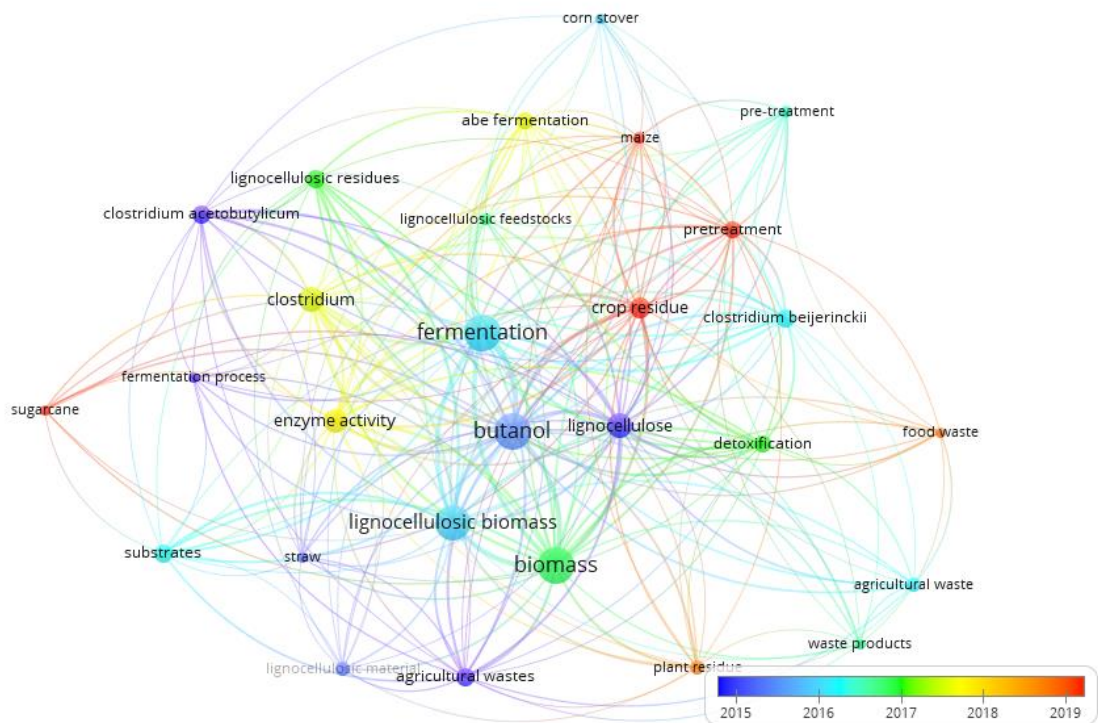
El n-butanol también se puede producir mediante la síntesis de Reppe, es decir, la carbonilación del propeno, desarrollada por Reppe en 1942. En este proceso, el propeno, el monóxido de carbono y el agua reaccionan a una presión de 0,5– 2×10^6 pascales y una temperatura de 100 °C en presencia de un catalizador (sal de amonio terciario o hidruros de carbonilo de hierro polinuclear). El 1-butanol y el 2-metil-1-propanol se forman directamente en una proporción de 86:14. El proceso Reppe no tuvo tanto éxito como la oxosíntesis con el catalizador de Cobalto, a pesar de la relación más favorable de n-butanol a isobutanol y las condiciones de reacción más suaves. Esto se debió a la tecnología de proceso más costosa (Uyttebroek, Van hecke, & Vanbroekhoven, 2015).

Hasta la década de 1950, la ruta petroquímica para la producción de n-butanol se basaba en una condensación aldólica de acetaldehído, seguida de una deshidratación y posterior hidrogenación de crotonaldehído. Con el desarrollo de la oxosíntesis, este proceso fue abandonado. La condensación aldólica se realizó a temperatura y presión ambiente en presencia de catalizadores alcalinos, la deshidratación se indujo por acidificación con ácido acético o fosfórico y posterior destilación, la hidrogenación se realizó en fase gaseosa o líquida con un catalizador de Cobre. Se obtuvieron alrededor de 1000 kg de 1-butanol a partir de 1350 kg de acetaldehído (Uyttebroek, Van hecke, & Vanbroekhoven, 2015).

El principal proceso petroquímico para la generación de butanol es la Oxosíntesis, en la cual se deben tener en cuenta diferentes etapas, se debe iniciar si es necesario con la purificación de la olefina, la cual debe estar entre el 95% y 99,5% molar; posteriormente se realiza la hidroformilación de las olefinas, para la obtención de los aldehídos que posteriormente se hidrogenarán, en la reacción el monóxido del gas de síntesis interactúa con el catalizador para introducirse en la olefina a través de su doble enlace carbono-carbono, el hidrógeno del gas de síntesis hidrogena el doble enlace carbono-carbono resultante, esta reacción da lugar a un ratio n:i de entre 80:20 y 30:1 dependiendo de las condiciones de reacción y tipo de catalizador.

3.1.4 Evaluación de información en software VOSviewer. En base a la ecuación de búsqueda *“production of butanol from lignocellulosic residues”*, se realizaron dos visualizaciones en el Software VOSviewer versión 1.6.13, a partir de dos archivos con extensiones de información tipo “CSV” para Scopus y “TXT” para Web of Science, en los cuales se evaluaron la co-ocurrencia de términos para determinar los residuos de tipo lignocelulósicos más estudiados y publicados en las bases de datos como se muestra en las figuras 5 y 6.

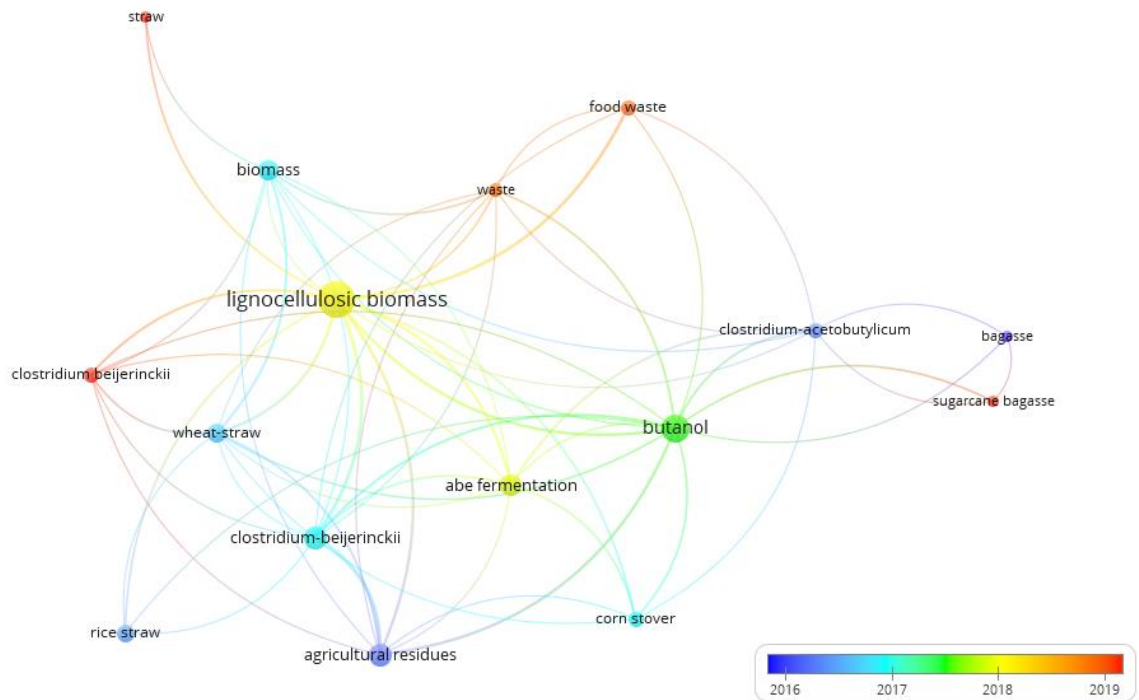
Figura 5. Co-ocurrencia de términos en Scopus para residuos lignocelulósicos



Fuente: Propia de la investigación

De la figura 5 se observa que los residuos lignocelulósicos más empleados para la obtención de butanol en los estudios publicados en Scopus son: paja, ubicada cerca del año 2015, residuo que hace referencia a los tallos, hojas y rastrojo de cultivos como maíz, soya, arroz y otros; de hecho el rastrojo de maíz se observa por separado en el año 2016, ya que varios estudios lo mencionan como materia prima para producción de butanol; en el 2019 aparecen dos residuos los cuales son el maíz y la caña de azúcar, siendo este último el residuo de interés dentro de la investigación.

Figura 6. Co-ocurrencia de términos en Web of Science para residuos

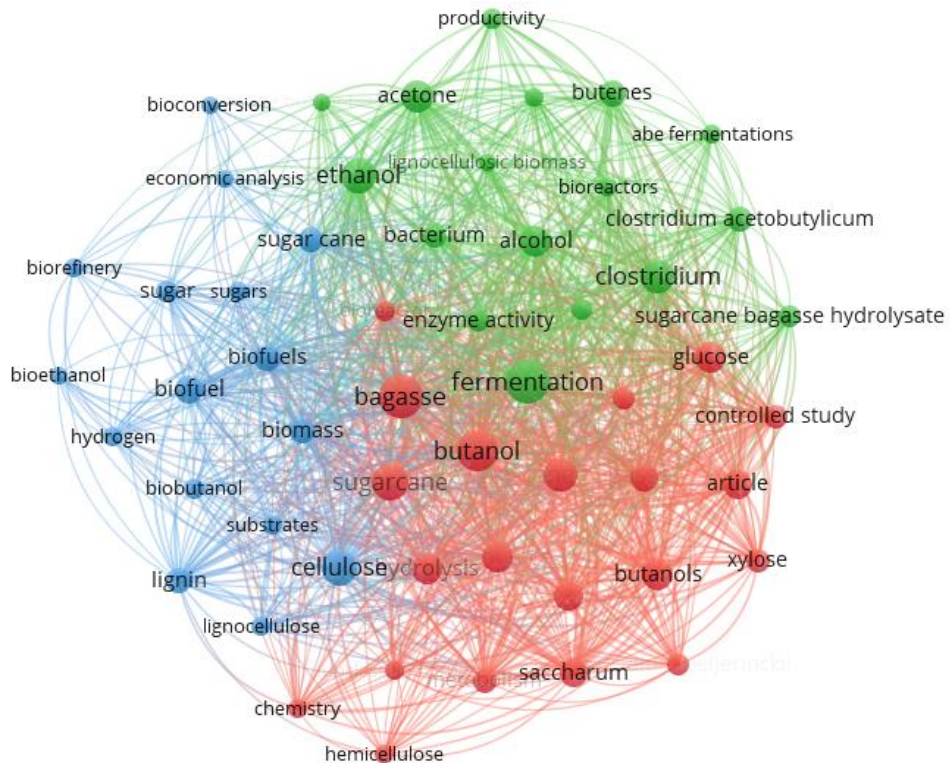


Fuente: Propia de la investigación

La figura 6 muestra los distintos residuos lignocelulósicos descritos en investigaciones de la base de datos Web of Science, cerca del año 2016 se encuentra residuos tales como bagazo y paja de arroz, para el año 2017 el rastrojo y paja de maíz, y finalmente para el año 2019 se encuentra el bagazo de caña de azúcar, que a diferencia de lo encontrado en la base de datos Scopus se presenta la descripción del residuo y no solo la materia prima a la que pertenece. En ambas bases de datos se ve reflejado un interés resiente en la caña de azúcar principalmente el bagazo, ya que es una fuente renovable abundante y barata en ciertas zonas de producción.

A partir de la ecuación de búsqueda “*production of butanol from sugarcane bagasse*”, se filtraron dos documentos que contenían los 64 y 75 primeros artículos de la consulta para las bases de datos Scopus y Web of Science respectivamente, de ellos se realizaron las diferentes visualizaciones establecidas. Las figuras 7 y 8 muestran las redes de co-ocurrencias de términos para la base de datos Scopus, en la cual se empleó un número mínimo de 7 co-ocurrencias obteniendo 54 términos de un total de 1003 palabras clave.

Figura 7. Co-ocurrencia de los términos en Scopus para bagazo de caña de azúcar



Fuente: Propia de la investigación

En la figura 7 se observa tres clúster o grupos que contienen los 54 ítems (palabras clave), dispuesta y unidas por los colores rojo, azul y verde; cada grupo contiene los ítems con los que mayor fuerza de vínculo comparten. En la red hay tres palabras que sobresalen por su mayor co-ocurrencia y por la fuerza de sus vínculos, las cuales son butanol, bagazo de caña y fermentación, ubicadas en los círculos más grandes de cada grupo en el centro de la figura, estas palabras contemplan el producto final objetivo, la materia prima inicial y el medio tecnológico de obtención respectivamente.

De la figura cabe destacar que mencionan una fermentación general y más específicamente la fermentación ABE, indicando que la mayoría de las investigaciones contemplan esta fermentación como medio de obtención de butanol; de igual forma mencionan los *Clostridium* como microorganismos fermentativos generales, y específicamente el *Clostridium acetobutylicum* como uno de los más usados. También se encuentran palabras relacionadas con la fermentación las cuales son acetona, etanol, alcohol, celulosa, sustrato, producción, bioconversión entre muchas otras; lo cual indica que cada palabra está relacionada con las demás, independientemente del clúster al cual pertenece.

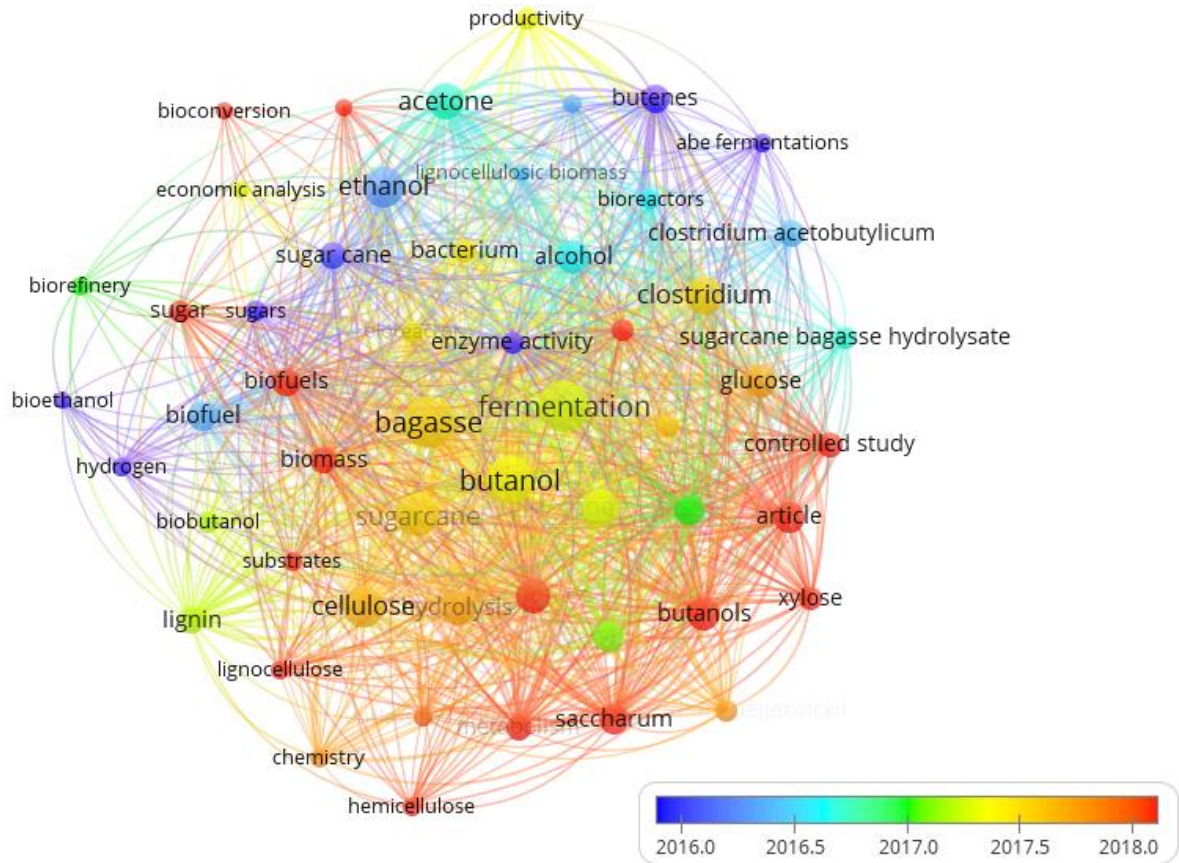
Tabla 2. Términos agrupados por clúster en Scopus

CLÚSTER	COLOR	TÉRMINOS	CLÚSTER	COLOR	TÉRMINOS
1	Red	Article	2	Green	Bioreactors
1	Red	Bagasse	2	Green	Butenes
1	Red	Bioreactor	2	Green	Clostridium
1	Red	Butanol	2	Green	Clostridium acetobutylicum
1	Red	Butanols	2	Green	Enzymatic hydrolysis
1	Red	Chemistry	2	Green	Enzyme activity
1	Red	Clostridium beijerinckii	2	Green	Ethanol
1	Red	Concentration (Composition)	2	Green	Fermentation
1	Red	Controlled study	2	Green	Lignocellulosic biomass
1	Red	Glucose	2	Green	Productivity
1	Red	Hemicellulose	2	Green	Sugarcane bagasse hydrolysate
1	Red	Hydrolysis	3	Blue	Biobutanol
1	Red	Metabolism	3	Blue	Bioconversion
1	Red	Nonhuman	3	Blue	Bioethanol
1	Red	Priority journal	3	Blue	Biofuel
1	Red	Saccharum	3	Blue	Biofuels
1	Red	Sugar-cane bagasse	3	Blue	Biomass
1	Red	Sugarcane	3	Blue	Biorefinery
1	Red	Sugarcane bagasse	3	Blue	Cellulose
1	Red	Unclassified drug	3	Blue	Economic analysis
1	Red	Xylose	3	Blue	Hydrogen
2	Green	Abe fermentations	3	Blue	Lignin
2	Green	Acetone	3	Blue	Lignocellulose
2	Green	Acetone butanol ethanol	3	Blue	Substrates
2	Green	Acetona-butanol-ethanol	3	Blue	Sugar
2	Green	Alcohol	3	Blue	Sugarcane
2	Green	Bacterium	3	Blue	Sugars

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 2 muestra las 54 palabras que poseen más de 7 co-ocurrencias dentro de los artículos, de ella se observa cómo son clasificadas según la fuerza de sus vínculos; en el grupo de color rojo se encuentran términos relacionados a artículos que buscan principalmente la obtención de butanol, empleando el *Clostridium beijerinckii* a partir de bagazo de caña de azúcar, con procesos que obtengan xilosa y glucosa a partir de la hemicelulosa; el grupo verde brinda un enfoque más global al hablar de una fermentación ABE y de sus productos obtenidos, mencionando la hidrólisis del bagazo de caña y la utilización de *Clostridium*, específicamente el *Clostridium acetobutylicum*; y finalmente el grupo de color azul expresa términos como biorrefinería, y trata sobre el empleo de sustratos como la caña y derivados del azúcar para la bioconversión a productos como el biobutanol y el bioetanol, aprovechando su contenido de lignocelulosa y celulosa, también menciona la lignina aunque esta fracción usualmente se elimina por los problemas que genera dentro del proceso.

Figura 8. Relación de los años y los términos en Scopus

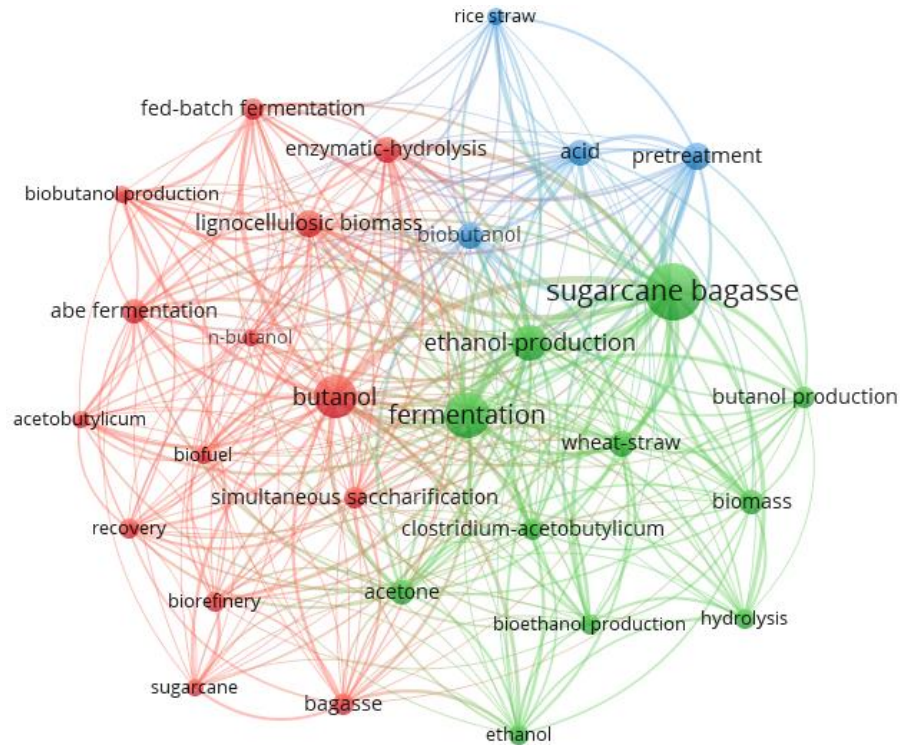


Fuente: Propia de la investigación

La figura 8 muestra que la fermentación ABE se empleó en mayor medida dentro de los artículos de investigación cercanos al año 2016, a mediados del mismo año los artículos tratan sobre la hidrólisis del bagazo de caña. Dentro de la línea de tiempo cabe resaltar la palabra “lignina” con color amarillo verdoso, ubicado en el año 2017, debido a que siendo la fracción que limita los rendimientos de butanol, los investigadores ya empiezan a mencionar o buscar estrategias de cómo tratar o eliminar esta fracción; a medidos del 2017 surge la palabra productividad, pues es una variable importante dentro de cualquier estudio de investigación. A partir del año 2018 se ve el empleo de hemicelulosa y su conversión a xilosa, al igual que la importancia de realizar un control dentro de los estudios.

Las figuras 9 y 10 muestran las co-ocurrencias de palabras dentro de los artículos para la base de datos Web of Science, en las cuales con un número mínimo de 7 co-ocurrencias se obtuvieron 29 términos de un total de 525 términos clave.

Figura 9. Co-ocurrencia de los términos en Web of Science para bagazo



Fuente: Propia de la investigación

La red de la figura 9 muestra tres grupos o clúster, de las cuales las palabras con mayor co-ocurrencia son bagazo de caña de azúcar, fermentación, producción de etanol y butanol; se observa que en el grupo de color rojo presenta una fermentación general y específicamente la fermentación ABE, relacionados con una fermentación alimentada por lotes y una sacarificación simultánea, dentro de los microorganismos empleados están los *Clostridium acetobutylicum*.

El grupo de color verde posee una fermentación general y específicamente el uso del *Clostridium acetobutylicum*, lo que indica que la mayoría de investigación publicadas dentro de la base de datos prefieren este microorganismo para la fermentación, la diferencia entre los grupos rojo y verde, es que el grupo verde muestra los tres productos de la fermentación mientras el grupo rojo se especializa en el butanol, biobutanol o n-butanol; y el grupo azul es el más pequeño, indicando que sus términos tienen poca interacción con otros términos, resalta que contiene las palabras pretratamiento y ácido, las cuales se relacionan directamente para la eliminación de lignina de la materia prima.

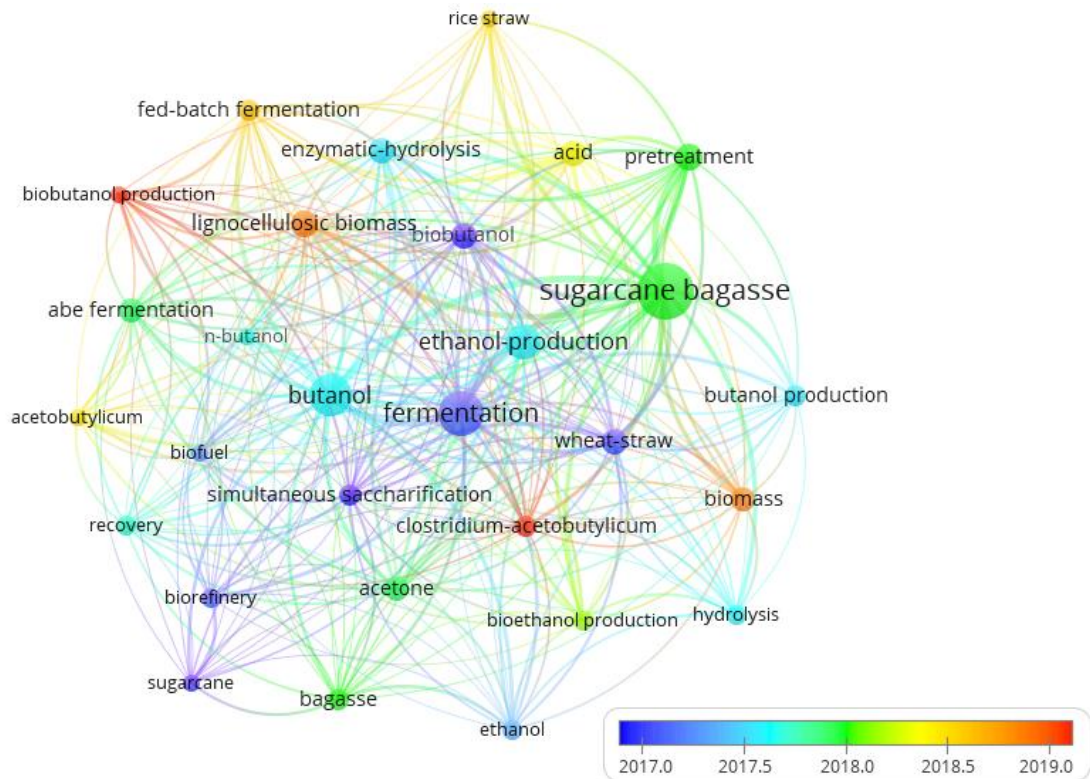
Tabla 3. Términos agrupados por clúster en Web of Science

CLÚSTER	COLOR	TÉRMINOS	CLÚSTER	COLOR	TÉRMINOS
1		Abe fermentation	2		Bioethanol production
1		Acetobutylicum	2		Biomass
1		Bagasse	2		Butanol production
1		Biobutanol production	2		Clostridium-acetobutylicum
1		Biofuel	2		Ethanol
1		Biorefinery	2		Ethanol-production
1		Butanol	2		Fermentation
1		Enzymatic-hydrolysis	2		Hydrolysis
1		Fed-batch fermentation	2		Sugarcane bagasse
1		Lignocellulosic biomass	2		Wheat-straw
1		n-butanol	3		Acid
1		Recovery	3		Biobutanol
1		Simultaneous saccharification	3		Pretreatment
1		Sugarcane	3		Rice Straw
2		Acetone			

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 3 muestra la distribución de los términos dentro de cada clúster de la red de la figura 9, se observa que el grupo de color rojo menciona la fermentación ABE y como microorganismo fermentador el *Clostridium acetobutylicum* y la relaciona principalmente con la producción de butanol; el grupo de color verde relaciona la fermentación general y la producción de acetona, butanol y etanol, productos propios de la fermentación ABE aunque no se menciona en el grupo; y el grupo azul relaciona cuatro palabras, entre ellas “pretratamiento”, en el cual se suelen emplear diversas tecnologías para tratar la biomasa lignocelulósica, entre ellas los ácidos para la eliminación de la fracción de lignina.

Figura 10. Relación de los años y los términos en Web of Science

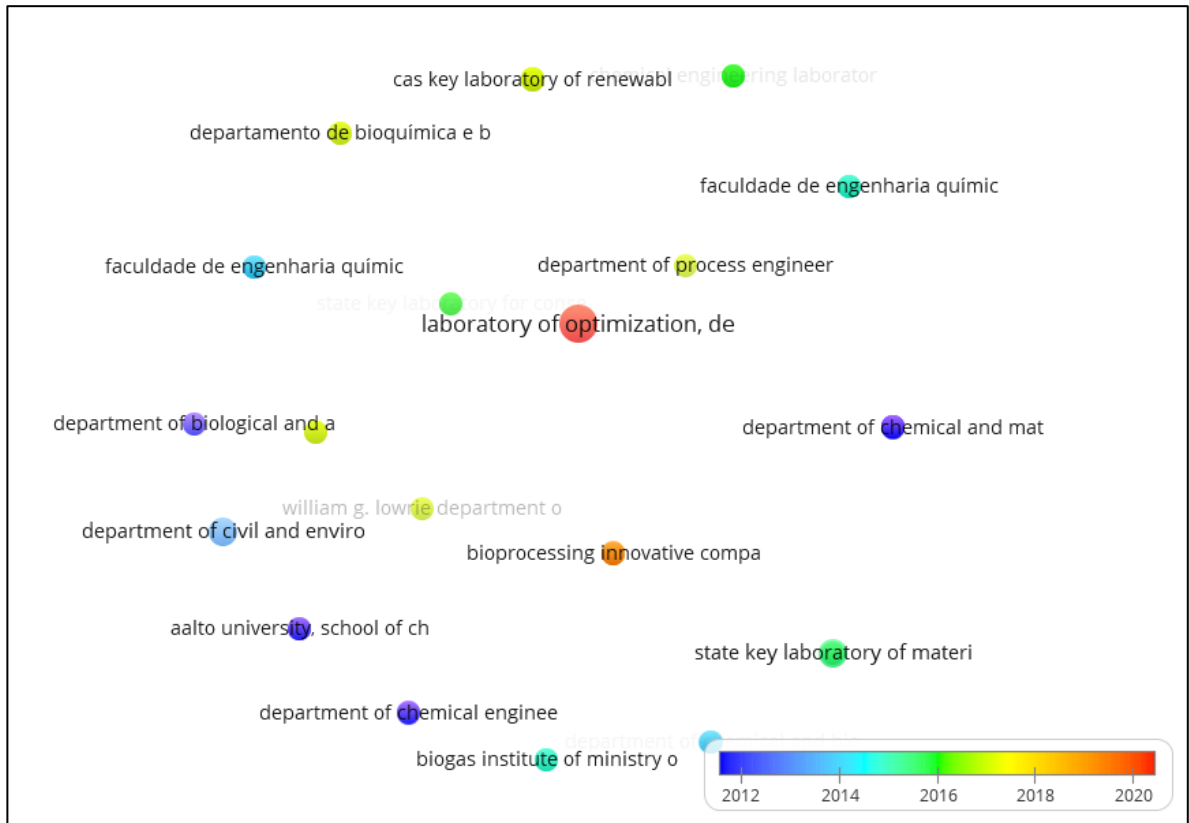


Fuente: Propia de la investigación

Dentro de la línea de tiempo que se expone en la figura 10, se observa la evolución de las investigaciones en relación a la producción de butanol a partir de un fermentación de bagazo de caña de azúcar; a partir del año 2018 la fermentación ABE muestra una fuerte relación con los pretratamientos a los que se somete el bagazo de caña, empleando principalmente ácidos; el único microorganismo fermentador que mayor co-ocurrencias tuvo dentro de los artículos fue el *Clostridium acetobutylicum* ubicado cerca al año 2018 hacia adelante.

Las figuras 11 y 12 muestran las visualizaciones de redes para la coautoría de las instituciones de los artículos para la base de datos Scopus, en las cuales con un número mínimo de 1 documento por institución se obtuvieron 148 instituciones o ítems, de los cuales se filtró manualmente aquellas instituciones con igual o menor a 20 citas.

Figura 11. Relación de los años e instituciones en Scopus



Fuente: Propia de la investigación

De la figura 11 destaca que los ítems no poseen enlaces entre sí, debido a que la fuerza de sus vínculos es mínima; la coautoría de instituciones relaciona el número de investigaciones en la que dos instituciones han sido coautores, lo cual genera que las principales investigaciones en producción de butanol a partir de caña de azúcar no se generan en conjunto con otras instituciones, debido quizá a que los investigadores son de diferentes países; las investigaciones más reciente de entre los años 2019 y 2020, fueron realizadas por dos instituciones, entre ellas: empresa innovadora de bioprocésamiento ubicada en Dublín-Estados Unidos (Bioprocessing innovative company) y el laboratorio de optimización, diseño y control avanzado de la universidad de Campinas-Brasil (Laboratory of optimization, design, and advanced control).

Tabla 4. Nombre de instituciones y país de origen en Scopus

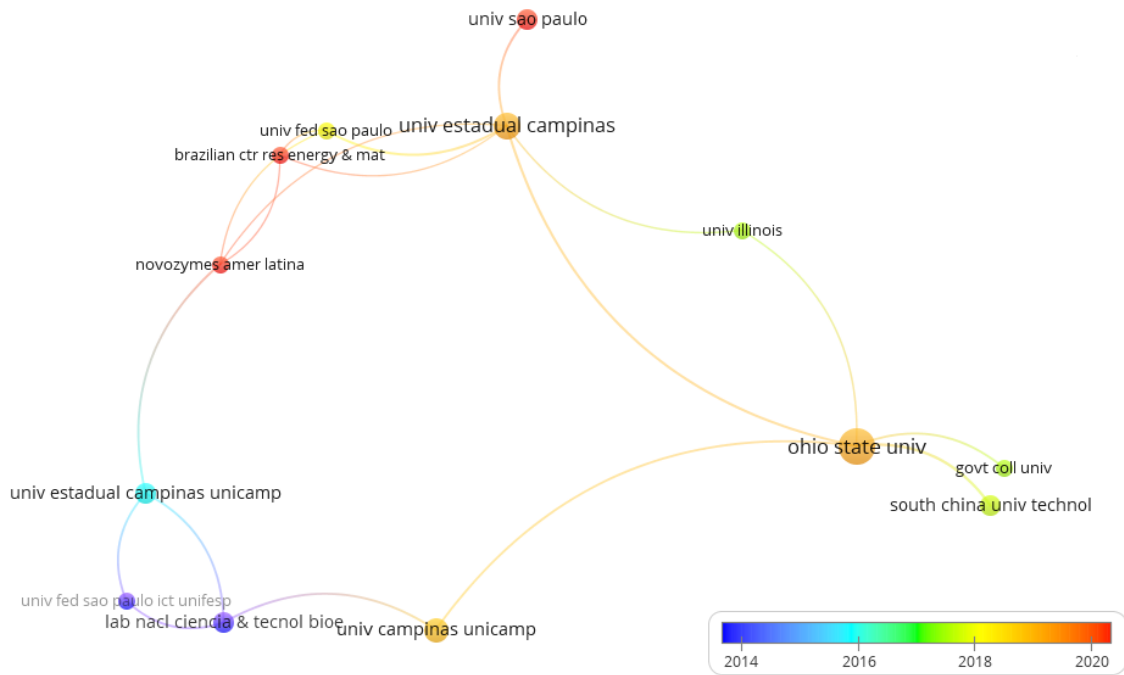
COLOR	INSTITUCIÓN	PAÍS	COLOR	INSTITUCIÓN	PAÍS
	National Ilian University	Ilian-Taiwan		Institute of Chemical technology	Mumbai-India
	National Cheng Kung University	Tainan-Taiwan		Universidade Federal Do Paraná	Paraná-Brazil
	Feng Chia University	Taichung-Taiwan		Universidade Federal Do Paraná	Paraná-Brazil
	National Cheng Kung University	Tainan-Taiwan		University of la Coruña	La Coruña-Spain
	National Cheng Kung University	Tainan-Taiwan		University of Oviedo	Oviedo-Spain
	National Cheng Kung University	Tainan-Taiwan		Imperial College London	London-United Kingdom
	Cas Key Laboratory of Renewable Energy Guangzhou	Guangzhou-China		Stellenbosch University	Stellenbosch-South Africa
	Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development	Guangzhou-China		University of Singapore	Singapore
	Guangdong Institute of Energy Conversion, Chinese academy of Sciences	Guangzhou-China		National University of Singapore	Singapore
	Guangzhou Intitute of Energy Conversion	Guangzhou-China		Indian Institute of Technology Gandhinagar	Guajarat-India
	University of Chinesse Academy of Sciences	Beijing-China		Indian Institute of Technology Gandhinagar	Guajarat-India
	Bioprocessing Innovative Company	Dublin-United States		Biogas Institute of Ministry of Agriculture	Sichuan-China
	College of Biology & Engineering. Hebei University of Economics & Business	Shijiazhuang-China		Sichuan Academy of Grassland	Sichuan-China
	University of Macau	Taipa-china		Nanjing Tech University	Nanjing-China
	The Ohio State University	Columbus-United States		Nanjing Tech University	Nanjing-China
	Universidade Estadual de Campinas	Campinas-Brazil		North Carolina State University	Raleigh-United States
	Universidade Federal Sao Paulo	Sao Paulo-Brazil		National University of Singapore	Singapore
	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia Do Bioetanol	Campinas-Brazil		University of Stellenbosch	Stellenbosch-South Africa
	Universidade Estadual de Campinas	Campinas-Brazil		University of Campinas	Campinas-Brazil
	Universidade Federal Sao Paulo	Sao Paulo-Brazil		Guangxi University	Guangxi-China
	Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia Do Bioetanol	Sao Paulo-Brazil		The Ohio State University	Columbus-United States
	Aalto University	Aalto-Finland			

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 4 muestra las 43 instituciones con mayor citación y coautoría dentro de la filtración de documentos a partir de la ecuación de búsqueda, las investigaciones fueron publicadas por diversas instituciones de 10 países, de los cuales China y Brasil poseen mayor número de publicaciones, por el contrario Finlandia y reino unidos son los países con menor número de documentos publicados y citados; dentro de las instituciones el 67% son universidades, el 23% son laboratorios e institutos y el ultimo 10% lo conforman otras entidades como empresas.

La figura 12 muestra la visualización de la coautoría de las instituciones de la base de datos Web of Science; se realizaron dos filtraciones para la creación de la red, una de ellas se realizó en las especificaciones del Software en la cual se establecieron las instituciones con un número mínimo 2 documentos, de esto se obtuvo un total de 27 instituciones de un total de 132, y por otro lado una filtración manual del listado del primer filtro en la cual se obtuvieron 13 instituciones, se descartaron aquellas instituciones con un número menor e igual a 42 citaciones dentro de los documentos obtenidos de la ecuación de búsqueda.

Figura 12. Relación de los años e instituciones en Web of Science



Fuente: Propia de la investigación

A diferencia de la figura 11, la figura 12 muestra un número menor de instituciones y enlaces entre ellas, lo que significa que si hay interacción entre las investigaciones de diferentes instituciones, por los enlaces evidenciados en la figura 12 la universidad estatal de Campinas obtiene el mayor número de enlaces (5 enlaces), interactuando con instituciones de su mismo país y con otros países como Estados Unidos. Se observa que las investigaciones más recientes fueron realizadas por Novozymes América latina y Brazilian center for research in energy and materials (CNPEN), empresas de Brasil, ubicadas por su color cercanas al año 2020. La institución con mayor fuerza de enlaces en coautoría es la universidad estatal de Ohio Estados Unidos, ubicada cerca al año 2018.

Tabla 5. Nombre de instituciones y país de origen en Web of Science

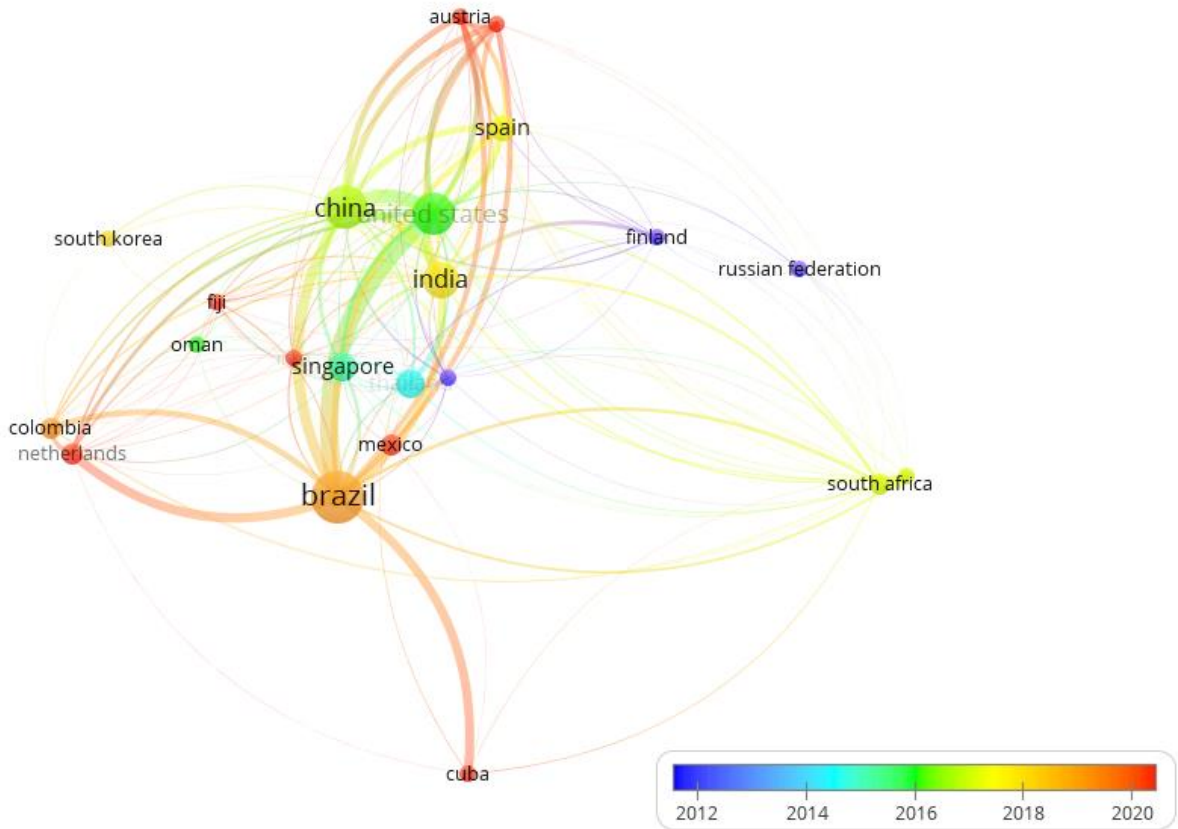
COLOR	INSTITUCIÓN	PAÍS
	Novozymes America Latina	Brazil
	Universidade Estadual Campinas	Brazil
	Universidade Federal Sao Paulo	Brazil
	Universidade Sao Paulo	Brazil
	Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEN)	Brazil
	Ohio State University	Pakistan
	Facultad de Gobierno de la Universidad de Lahore	United Sates
	South China University of Technology	China
	Laboratorio Nacional de Ciencia y Tecnologia de Bioetanol (CTBE)	Brazil
	Universidade Estadual Campinas	Brazil
	Universidade Estadual Campinas	Brazil
	Universidades Federal Sao Paulo	Brazil
	University of Illinois at Urbana-Champaign	United Sates

Fuente: Propia de la investigación

De la tabla 5 se observa que el 76,9% de las instituciones son universidades de los países de Brasil, Estados Unidos, China y Pakistán, siendo Brasil el país con mayor número de investigaciones con un 69,2% de las investigaciones. Se observa que algunas instituciones se repiten dentro de la tabla 5 debido a que en los documentos obtenidos a partir de la ecuación de búsqueda, las instituciones se mencionan con nombres abreviados dando un resultado variado aunque sean la misma institución, y el software VOSviewer los muestra como ítems diferentes.

Las figuras 13 y 14 muestran el acoplamiento bibliográfico de los países en la base de datos Scopus, la filtración se realizó con un número mínimo de 1 artículo por país, del cual se obtuvieron un total de 22 países; de igual forma las figuras 15 y 16 muestran el acoplamiento bibliográfico de los países en la base de datos Web of Science, con el mismo número mínimo de artículo por país en la filtración, del cual se obtuvieron un total de 29 países.

Figura 13. Relación de los años y los países en Scopus



Fuente: Propia de la investigación

La publicación de investigaciones de los diversos países a cerca de la obtención de butanol se observa en la figura 13, de esta se obtiene que los artículos más antiguos filtrados en la base de datos provienen de la federación rusa y Finlandia, publicados en el año 2012; el mayor precursor de publicaciones y de mayor relación con otros artículos es Brasil, ubicado en la parte central y sus publicaciones oscilan entre el año 2018 al igual que Colombia, país con el que posee relación en las publicaciones; Austria, Cuba, México, Singapur, Fiji y los países bajos, son los que tienen publicaciones más recientes.

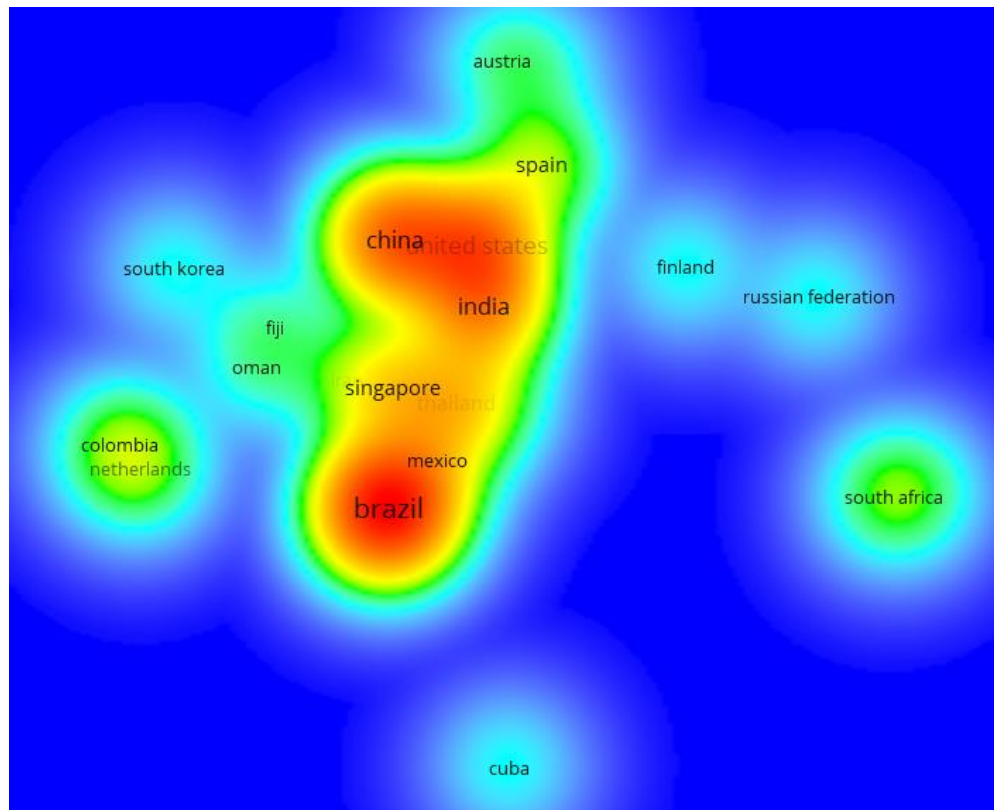
Tabla 6. Países de origen de las publicaciones en Scopus

CLÚSTER	COLOR	PAÍS	CLÚSTER	COLOR	PAÍS
1	Red	China	2	Green	New Zealand
1	Red	Fiji	2	Green	Spain
1	Red	India	2	Green	United States
1	Red	Iran	3	Blue	Brazil
1	Red	Mexico	3	Blue	Colombia
1	Red	Oman	3	Blue	Cuba
1	Red	Singapore	3	Blue	Netherlands
1	Red	South Korea	4	Yellow	Finland
1	Red	Taiwan	4	Yellow	Russian Federation
1	Red	Thailand	4	Yellow	South Africa
2	Green	Austria	4	Yellow	United Kingdom

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 4 muestra los 22 países de los cuales provienen las investigaciones filtradas a partir de la ecuación de búsqueda, el clúster o grupo de color rojo es el que posee mayor número de países, de los cuales China e India son los que más publicaciones y relaciones tienen en el año 2016; de los demás grupos el de color azul presenta a Brasil como el mayor generador de artículos y con mayor relaciones entre investigaciones; de esta misma tabla se puede notar que la clasificación de los clústeres se realiza siguiendo la fuerza de los enlaces en la filtración, y es por ello que hay diversidad de países de diferentes continentes conformando un clúster, la ubicación geográfica de los investigadores no limitan el uso de un mismo estudio como base de una investigación, como se ve reflejado con los resultados del acoplamiento bibliográfico o enlaces de citación conjunta de la base de datos a partir de la ecuación de búsqueda.

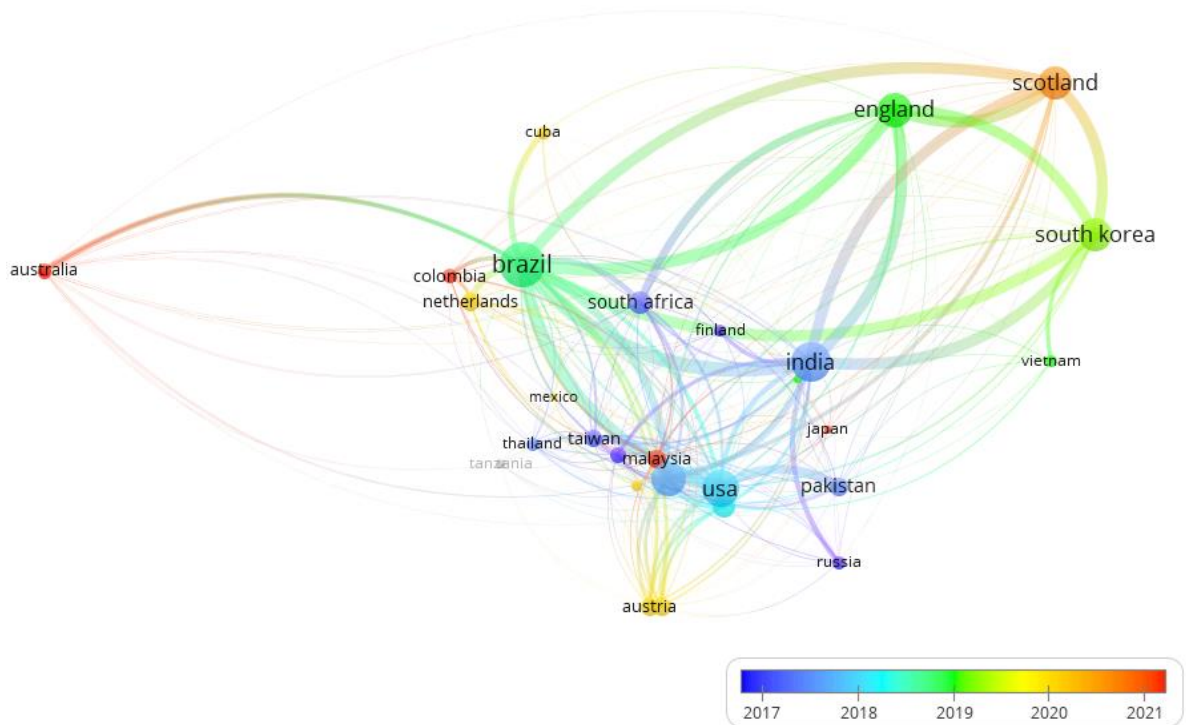
Figura 14. Densidad de los países en Scopus



Fuente: Propia de la investigación

La figura 14 muestra una de las visualizaciones opcionales del software VOSviewer, esta nos permite relacionar visualmente los colores rojo oscuro con los países que poseen mayor puntuación en número y relación con otros, estos países son Brasil, India, Estados Unidos y China, reafirmando lo observado en la figura 13; los países que se encuentran rodeados por un color azul celeste, son aquellos que menor relación y número de investigaciones posee, estos son Cuba, Corea del Sur, Finlandia y la Federación Rusa. Al comparar la figura 13 y la tabla 6 se observa que no hay ninguna tipo de relación entre la acomodación de los grupos y los años de publicación.

Figura 15. Relación de los años y los países en Web of Science



Fuente: Propia de la investigación

La figura 15 muestra los nombres de 29 países involucrados dentro las investigaciones filtradas dentro de la base de datos Web of Science, los nombres ubicados en la parte central indican que las investigaciones de estos países se relacionan en mayor medida; los países con círculos más grandes son aquellos que mayor investigaciones poseen, entre ellos Brasil, Corea del sur, Inglaterra, Escocia, India y Estados unidos; destaca que los países con publicaciones más recientes entre mediados del año 2020 y 2021 son Escocia, Australia, Malasia y Colombia.

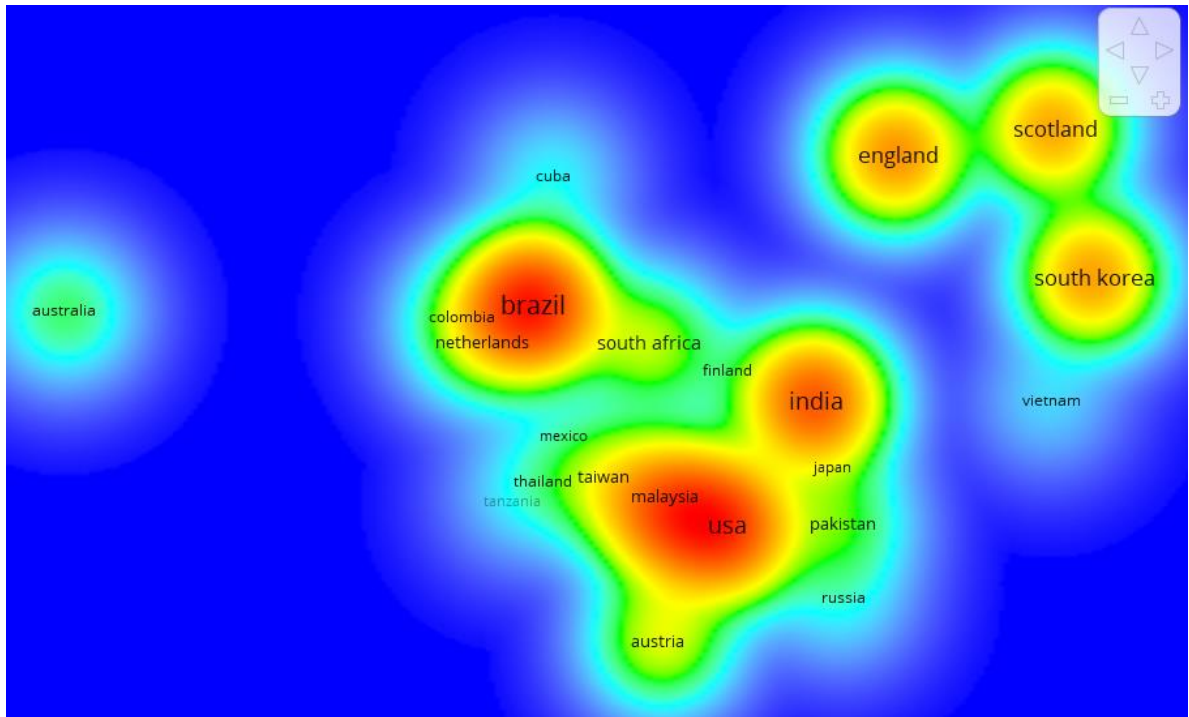
Tabla 7. Países de origen de las publicaciones en Web of Science

CLÚSTER	COLOR	PAÍS	CLÚSTER	COLOR	PAÍS
1		Austria	2		India
1		Iran	2		Italy
1		Malaysia	2		Japan
1		Mexico	2		Russia
1		New Zealand	2		South Korea
1		Pakistan	2		Vietnam
1		China	3		Brazil
1		Singapore	3		Colombia
1		South Africa	3		Cuba
1		Spain	3		Netherlands
1		Taiwan	4		Australia
1		Tanzania	4		Sri Lanka
1		Thailand	5		England
1		USA	5		Scotland
2		Finland			

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 7 muestra cómo están distribuidos los países en cada clúster por colores, el grupo con mayor países es el clúster 1 de color rojo, ubicados principalmente en el centro de la red, indican que los autores de sus nacionalidades emplean investigaciones de un amplio número de países, así cada grupo contiene los países que mayor fuerza poseen entre ellos, dentro de los clústeres restantes destaca el grupo de color azul, que contiene a Colombia mostrando que se relaciona con los países bajos, Cuba y Brasil, siendo Brasil país vecino de Colombia y ubicándose como el de mayor investigaciones publicadas y de mayor citación en otros documentos, dentro de los artículos filtrados en la base de datos.

Figura 16. Densidad de los países en Web of Science

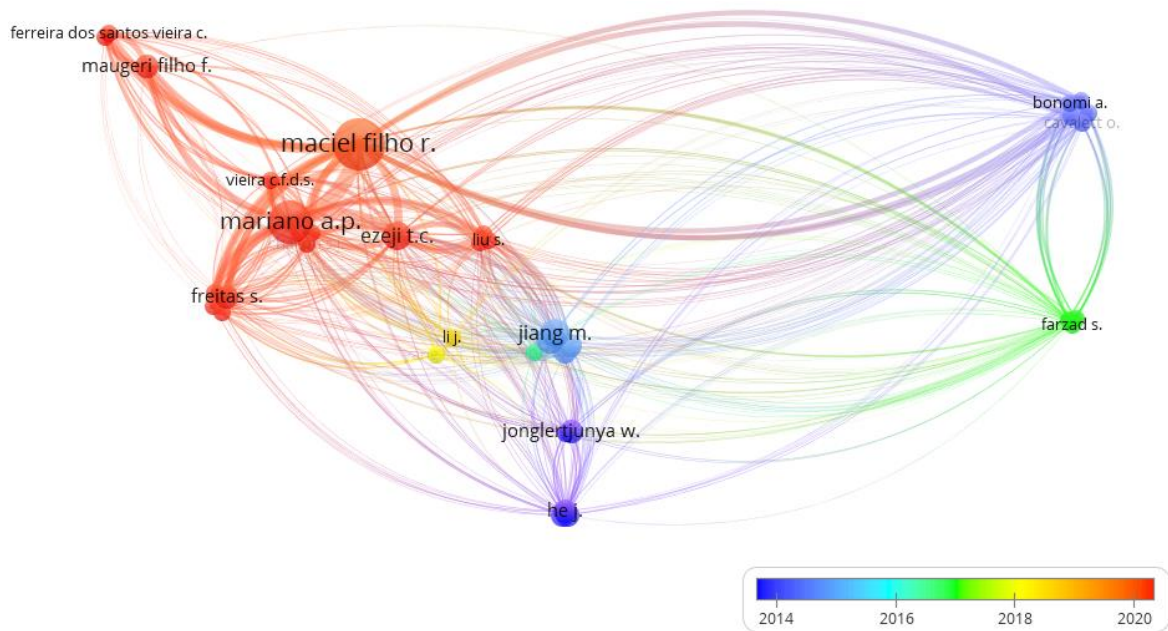


Fuente: Propia de la investigación

La figura 16 muestra como son las relaciones y la densidad del acoplamiento bibliografico de forma visual, los países que se ubican en colores cercanos al rojo son aquellos que poseen mayores investigaciones y estan mas relaciones con otros países, entre ellos encontramos a Brasil y Estados unidos como los principales, los de menor relación y citacion son Australia, Japon, Colombia y Malasia, aunque son países con artículos reciente como se observa en la figura 15.

Las figuras 17 y 18 muestran el acoplamiento bibliográfico de los autores en la base de datos Scopus, en la cual se realizó la filtración manual de los autores con un número mínimo de 2 documentos, de los cuales se obtuvieron 36 autores de un total de 267. De igual forma las figuras 17 y 18 muestran el acoplamiento bibliográfico de los autores en la base de datos Web of Science, con el mismo número mínimo de documentos por autor, de los cuales se obtuvieron 50 autores de un total de 344.

Figura 17. Relación de los años y los autores en Scopus



Fuente: Propia de la investigación

La figura 17 pertenece a la relación del año de publicación y los autores de las investigaciones, de la cual se observa que las publicaciones más antiguas según la filtración a partir de la ecuación de búsqueda se publicaron en el año 2014, y sus autores fueron He J., Bonomi A. y Jonglertunya W.; por otro lado las investigaciones más recientes se publicaron en 2020 y de los autores más destacados se observan Maciel Filho R y Mariano A.P; la figura muestra que hay más autores en las investigaciones próximas al año 2020 que en los años anteriores, y que todos los autores se relacionan notablemente por el número de enlaces que existe entre ellos, indicando que la base de cada autor en su investigación son datos históricos de investigaciones de años posteriores pero no lejanos a su investigación.

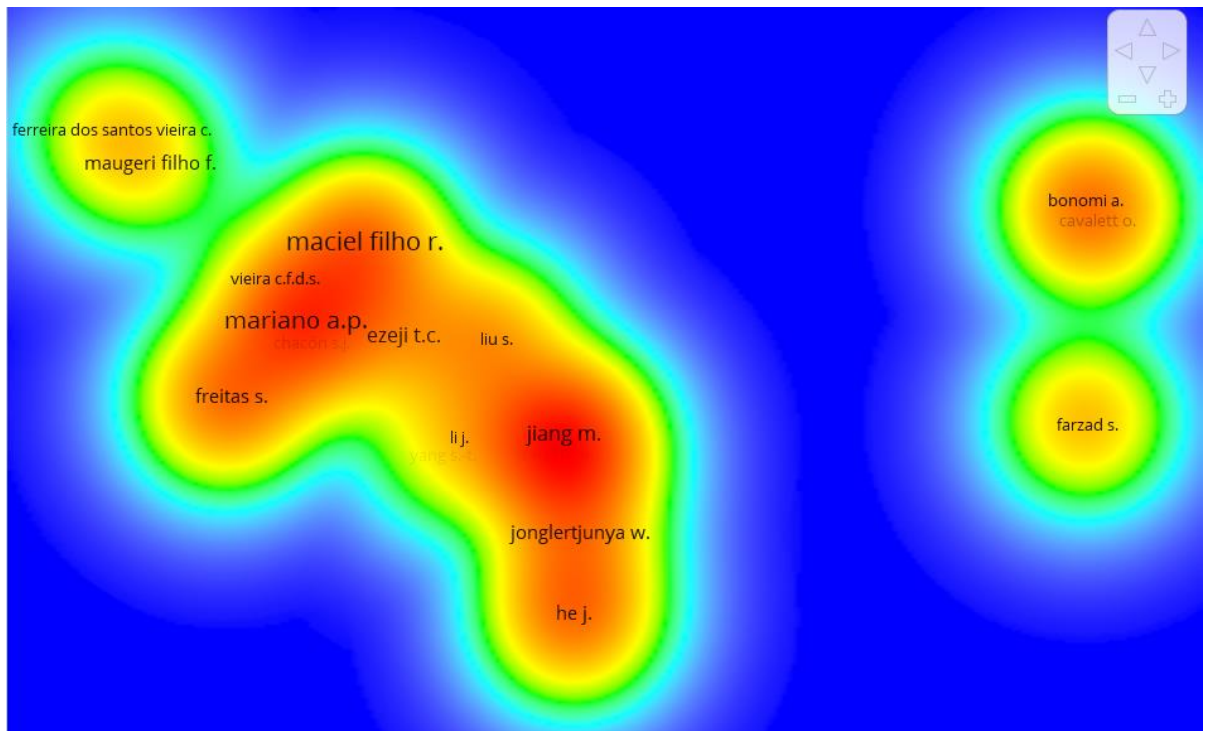
Tabla 8. Listado de autores agrupados por clúster en Scopus

CLÚSTER	COLOR	AUTOR	CLÚSTER	COLOR	AUTOR
1	Rojo	Enzeji T.C.	3	Azul	Jonglertjunya W.
1	Rojo	He A.	3	Azul	Li J.
1	Rojo	Jiang M.	3	Azul	Prayoonying P.
1	Rojo	Kong X.	3	Azul	Rajagopalan G.
1	Rojo	Liu S.	3	Azul	Yang K.L.
1	Rojo	Quereshi N.	3	Azul	Yang S.T.
1	Rojo	Saha B.C.	3	Amarillo	Bonomi A.
1	Rojo	Wang C.	4	Amarillo	Cavalett O.
1	Rojo	Wu H.	4	Amarillo	Changas M.F.
2	Verde	Chacon S.J.	4	Amarillo	Dias M.O.S.
2	Verde	Ferreira dos Santos Vieira	4	Amarillo	Pereira L.G.
2	Verde	Maciel Filho R.	5	Púrpura	Alves R.F.
2	Verde	Mariano A.P.	5	Púrpura	Freitas S.
2	Verde	Matias G.	5	Púrpura	Tovar L.P.
2	Verde	Maugeri Filho A.	5	Púrpura	Zetty Arenas A.M.
2	Verde	Pinto Mariano A.	6	Azul	Farzad S.
2	Verde	Vieira C.F.	6	Azul	Görgens J.F.
3	Azul	He J.	6	Azul	Mandegari M.A.

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 8 muestra la organización de los 36 autores en cada clústeres o grupo, de los cuales el clúster 1 de color rojo es el que mayor número de autores posee; los autores con mayores investigaciones y relación con otras como se muestra en la figura 17 (por el tamaño de los nodos) se encuentran en el grupo de color verde, los cuales son Maciel Filho R. y Mariano A.P, debido a que los autores que pertenece a un mismo clúster presentan mayor afinidad entre ellos, el software VOSviewer nos muestra 6 grupos muy bien definidos, los autores que se encuentran en cada uno de ellos relacionan sus investigaciones citando en mayor medida a los autores con los que comparten grupo en la tabla 8; aunque se relacionan con otros autores como se observa por los enlaces de los nodos en la figura 17, estos no comparten grupo debido al poco peso de las citas entre ellos.

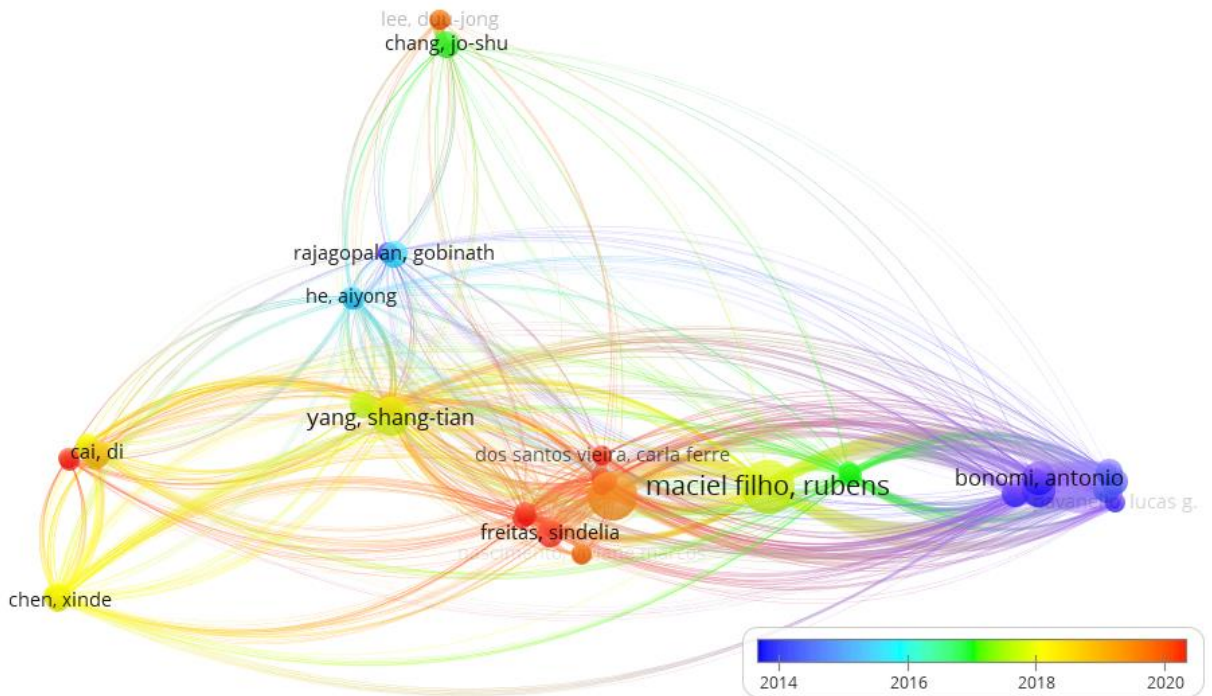
Figura 18. Densidad de los autores en Scopus



Fuente: Propia de la investigación

La figura 18 da una nueva visualización del comportamiento de los autores, de ella a diferencia de la figura 17 se observan un número mayor de autores que se relacionan entre sí, como es el caso de Jiang M. y Freitas S además de los ya expuestos Maciel Filho R. y Mariano A.P.; al analizar los colores que rodean a cada autor se concluye que todos se relacionan con uno o más autores debido al color y a la proximidad en los nodos, ya que todos están próximos al amarillo verdoso y ninguno se ubica rodeado cerca del azul celeste.

Figura 19. Relación de los años y los autores en Web of Science



Fuente: Propia de la investigación

La figura 19 muestra la relación de los autores y el año de publicación de las investigaciones, el autor Antonio Bonomi es el más visible del año 2014 dentro de la figura, año en el cual inician las investigaciones publicadas según las condiciones estipuladas en el software VOSviewer; en el año 2020 finalizan las publicaciones más visibles de los artículos, y de ellos sobresalen los autores Sindelia Freitas y Carla Dos santos, esto debido a que aunque hay otras investigaciones en 2021 estas son pocas y sus autores poseen pocos artículos y citas, otro posible motivo es el contexto global ocasionado por la pandemia Covid-19, por la cual se realizaron aislamientos preventivos para evitar el contagio entre las personas, afectando así las investigaciones en laboratorio sobre los diversos temas; las publicaciones de todos los autores se relacionan entre sí por el número de enlaces entre los nodos como se observan en la figura.

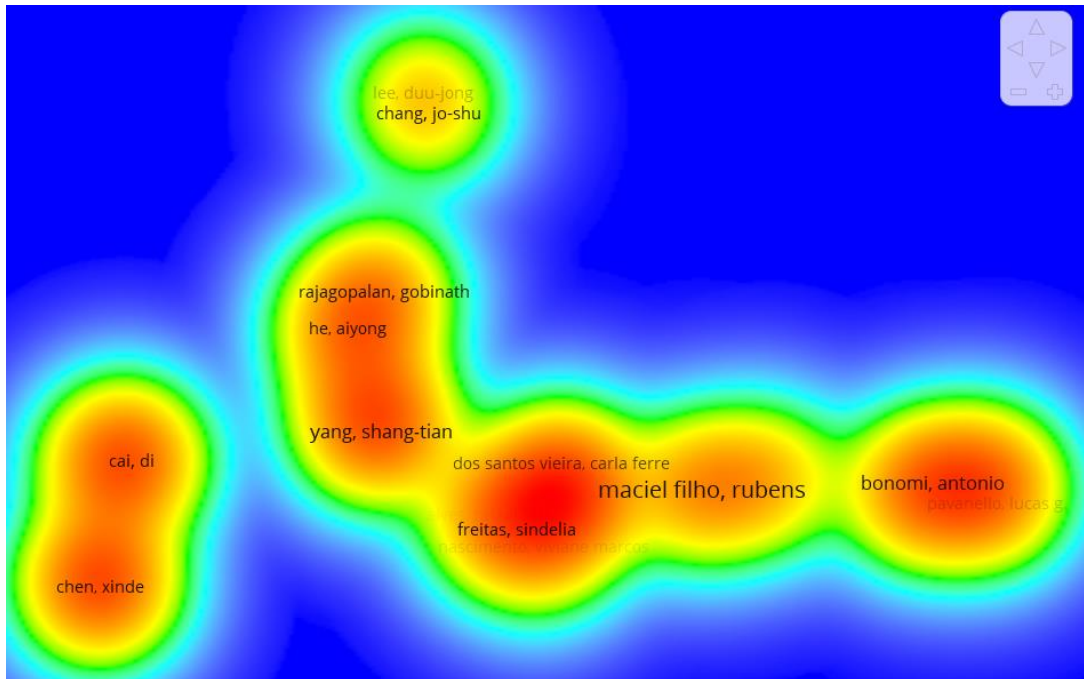
Tabla 9. Listado de autores agrupados por clúster en Web of Science

CLÚSTER	COLOR	AUTOR	CLÚSTER	COLOR	AUTOR
1		Alvez, Rafael Ferraz	4		Dias, Marina O.S.
1		Chacon, Suranny Jimenez	4		Junqueira, Tassia L.
1		Dos Santos Vieira, Carla Ferreira	4		Pavanello, Lucas G.
1		Ezeji, Thaddeus Chuckwuemeka	4		Pereira, Lucas G.
1		Freitas, Sindelia	5		Chen, Xinde
1		Maciel Filho, Rubens	5		Chen, Xuefang
1		Mariano, Adriano Pinto	5		Huang, Chao
1		Matias, Gabriela	5		Li, Hailong
1		Nascimento, Viviane Marcos	5		Luo, Mutan
1		Rabelo, Sarita Candida	5		Qi, Gaoxiang
1		Tovar, Laura Plazas	5		Xiong, Lian
1		Zetty Arenas, Ana Maria	6		Cai, Di
2		Chang, Jo-Shu	6		Chen, Bo
2		He, Aiyong	6		Chen, Changjing
2		He, Jianzhong	6		Chen, Huidong
2		Jiang, Min	6		Qin, Peiyong
2		Kong, Xiangping	6		Tan, Tianwei
2		Lee, Duu-Jong	7		Bao, Teng
2		Nagarajan, Dillirani	7		Du, Yinming
2		Rajagopalan, Gobinath	7		Lin, Meng
2		Wu, Hao	7		Wang, Jufang
2		Yang, Kun Lin	7		Yang, Shang-Tian
3		Bonomi, Antonio	8		Farzad, Somayeh
3		Cavalett, Otavio	8		Gorgens, Johann F.
3		Chagas, Mateus F.	8		Mandegari, Mohsen Ali

Fuente: Propia de la investigación

De la tabla 9 se logra observar cómo se organizaron los autores en los diferentes clúster, de los cuales el clúster 1 y el 2 son los más extensos, indicando que son investigaciones que se relacionan en gran medida con datos de otros autores; la tabla muestra no solo el nombre si no también el apellido del autor, a diferencia de la tabla 8 obtenida de la base de datos Scopus, pues esa es la forma de nomenclatura dentro de la base de datos.

Figura 20. Densidad de los autores en Web of Science



Fuente: Propia de la investigación

La visualización de densidad del acoplamiento bibliográfico de autores da a conocer que están muy relacionados entre sí, ya que los colores que rodean cada autor son de un tono de color vivo, además la distancia que existe entre los autores es corta; de esta grafica destacan autores como Rubens Maciel Filho, Antonio Bonomi y Sindelia Freitas, por su ubicación central dentro de la gráfica, el rojo vivo cerca de su ubicación y el tamaño de su nombre; por otro lado los de menor relación y de color amarillo son Jo-Shu Chang y Duu-Jong Lee.

3.2 ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

3.2.1 Índice de productividad personal. Debido al tipo de investigación a realizar, el índice de productividad personal se obtiene a través del número de publicaciones por investigadores citados dentro de las dos bases de datos empleadas (Scopus y Web of Science), se eligieron aquellos autores que en alguna de las dos bases de datos figura con al menos tres artículos publicados, el número de artículos publicados se obtuvo de la página de inicio de la filtración de la ecuación de búsqueda "*production of butanol from sugarcane bagasse*" para cada base de datos (Scopus, 2022; Web of Science, 2022), finalmente se calculó el índice de productividad de cada autor empleando la ecuación 1, los resultados se exponen en la tabla 10.

Tabla 10. Índices de productividad personal

AUTOR	WEB OF SCIENCE		SCOPUS	
	<i>N</i>	<i>IP =Log(N)</i>	<i>N</i>	<i>IP =Log(N)</i>
Maciel Filho, Rubens	9	0,954	7	0,845
Pinto Mariano, Adriano	8	0,903	6	0,778
Yang, Shang Tiang	5	0,699	2	0,301
Bonomi, Antonio	4	0,602	2	0,301
De Souza Dias, Marina Oliveira	4	0,602	2	0,301
Ezeji, Thaddeus Chukwuemeka	4	0,602	4	0,602
Cai, di	3	0,477	-	-
Cavalett, Octavio	3	0,477	2	0,301
Chagas, Mateus Ferreira	3	0,477	-	-
Chang, Jo-Shu	3	0,477	1	0,000
Freitas, Sindélia	3	0,477	3	0,477
Junqueira, Tassia	3	0,477	-	-
Pereira, Lucas	3	0,477	2	0,301
Qin, Peiyong	3	0,477	-	-
Rajagopalan, Gobinath	3	0,477	3	0,477
Wang J.F	3	0,477	-	-
Yang, Kunlín	3	0,477	3	0,477
Jiang, Min	2	0,301	4	0,602
Wu, Hao	2	0,301	4	0,602
Kong, Xiangping	2	0,301	3	0,477
Jonglertjanya, Woranart	1	0,000	3	0,477
Maugeri Filho, Francisco	-	-	3	0,477

Dónde; (*N*) es el número de artículos, e (*IP*) es el índice de productividad.

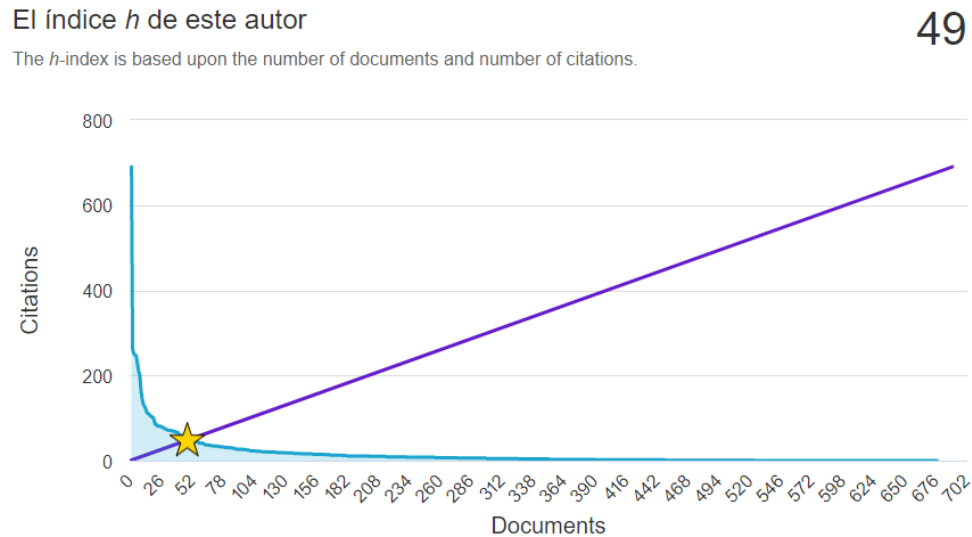
Fuente: Propia de la investigación

Los valores de los indicadores de productividad personal (*IP*) varían entre 0 a 1, de la tabla 10 se observa que los autores son productores intermedios, ya que ningún *IP* es mayor o igual a 1, el autor con mayor número de investigaciones solo posee 9 artículos dando como resultado un *IP* igual a 0.954, es por ellos que dentro de la investigación de producción y rendimientos de butanol a partir de biomasa lignocelulósica se evaluarán los artículos de Maciel R y Mariano A.P, autores con el mayor *IP* dentro de las dos bases de datos; con este índice se corrobora lo expuesto en las figuras 17 y 19 en las cuales las investigaciones de Maciel Filho R y Mariano A.P sobresalen en la red.

3.2.2 Índice H. Para determinar el valor del índice *H* se empleó las herramientas de cada base de datos, en las cuales se filtró los índices *H* de los autores Maciel Filho Rubens y Mariano A.P. (Obtenidos de la tabla 10), de los artículos obtenidos de la ecuación de búsqueda “*production of n-butanol from sugarcane bagasse*” y para los países de origen de las publicaciones. A continuación se muestran las

figuras relacionadas a los índices H de los dos autores, y para los artículos de la ecuación de cada base de datos empleada.

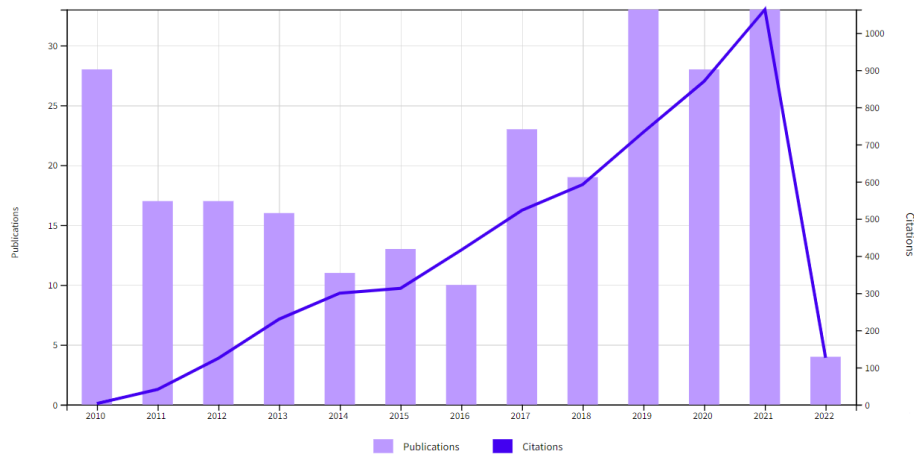
Figura 21. Índice H para el autor Maciel Filho Rubens en Scopus



Fuente: Filtración base de datos Scopus

De la base de datos Scopus se obtiene que el autor Maciel Filho Rubens, ha sido citado en 667 artículos dentro de la base de datos, lo que genera que su índice H sea de 49 como lo muestra la figura 21, este valor significa que este autor tiene 49 artículos con al menos 49 citas cada uno. También se realizó una filtración dentro de la base de datos para obtener los artículos relacionados con biocombustibles, caña de azúcar y butanol, de los cuales se generó un total de 110 artículos citados, con un índice H de 28, lo que significa que el autor tiene 28 artículos con al menos 28 citas cada uno.

Figura 22. Índice H para el autor Maciel Filho Rubens en Web of Science



Fuente: Filtración base de Web of Science

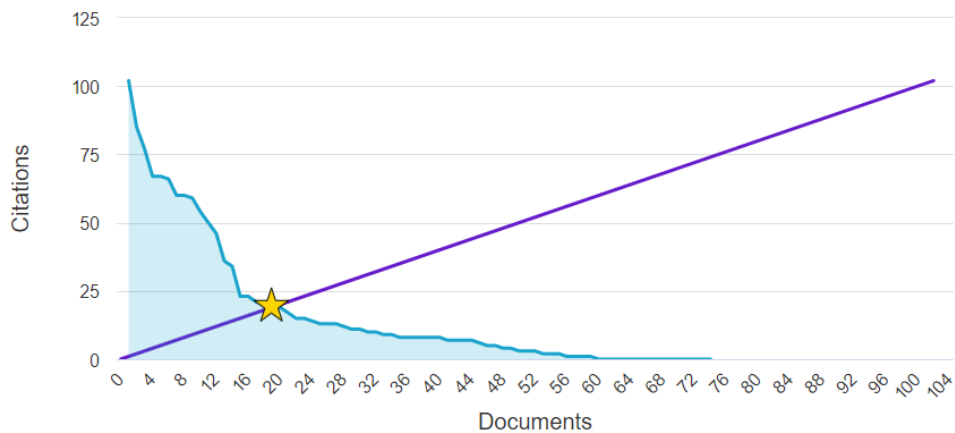
De la base de datos Web of science se obtiene que el autor Maciel Filho Rubens, ha sido citado en 252 publicaciones, lo que genera que su índice H sea de 37, este valor significa que este autor tiene 37 artículos con al menos 37 citas cada uno. Este índice indica que el autor posee información relevante dentro la investigación y ratifica lo expuesto en el software VOSviewer y el índice de productividad personal. De la figura 22 se obtiene que el autor público mayor número de artículos en el año 2019 y 2021, siendo este último año donde mayor fue citado por parte de otros autores.

Figura 23. Índice H para el autor Pinto Mariano Adriano en Scopus

El índice h de este autor

19

The h -index is based upon the number of documents and number of citations.



Fuente: Filtración base de datos Scopus

De la base de datos Scopus se obtiene que el autor Pinto Mariano Adriano, ha sido citado en 74 artículos dentro de la base de datos, lo que genera que su índice H sea de 19 como lo muestra la figura 23, este valor significa que este autor tiene 19 artículos con al menos 19 citas cada uno. También se realizó una filtración dentro de la base de datos para obtener los artículos relacionados con biocombustibles, caña de azúcar y butanol, de los cuales se generó un total de 30 artículos citados, con un índice H de 14, lo que significa que el autor tiene 14 artículos con al menos 14 citas cada uno.

Figura 24. Índice H para el autor Pinto Mariano Adriano en Web of Science



Fuente: Filtración base de datos Web of Science

De la base de datos Web of Science se obtiene que el autor Pinto Mariano Adriano, ha sido citado en 43 publicaciones entre el 2010 y el 2022, lo que genera que su índice H sea de 15, este valor significa que este autor tiene 15 artículos con al menos 15 citas cada uno. De la gráfica 24 se obtiene que los años donde publico mayor número de artículos fueran el 2010 y el 2021, siendo el 2021 el año donde mayor citación obtuvo por parte de otros autores.

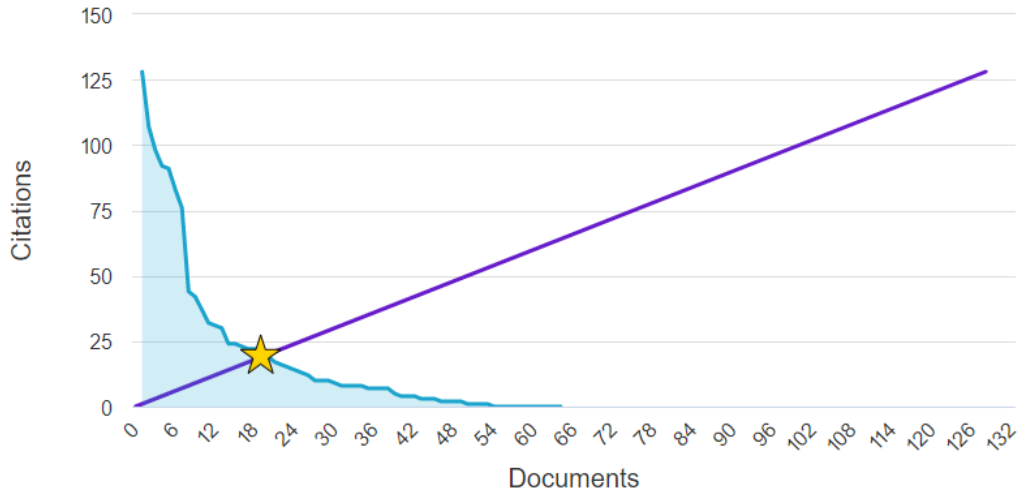
Con el cálculo de los índices H para estos dos autores se logra observar que la información de cada base de datos es diferente, pues como se observa los dos autores obtienen un índice H menor en la Web of Science, debido a que hay menos artículos que citan los autores en la base, factor que puede atribuirse a que la base de datos Web of Science realiza una búsqueda de los artículos a partir del año 2010, y la base de datos Scopus filtra información desde las primeras publicaciones de los autores.

Figura 25. Índice H para los artículos de la ecuación de búsqueda en Scopus

Estos documentos h -index

19

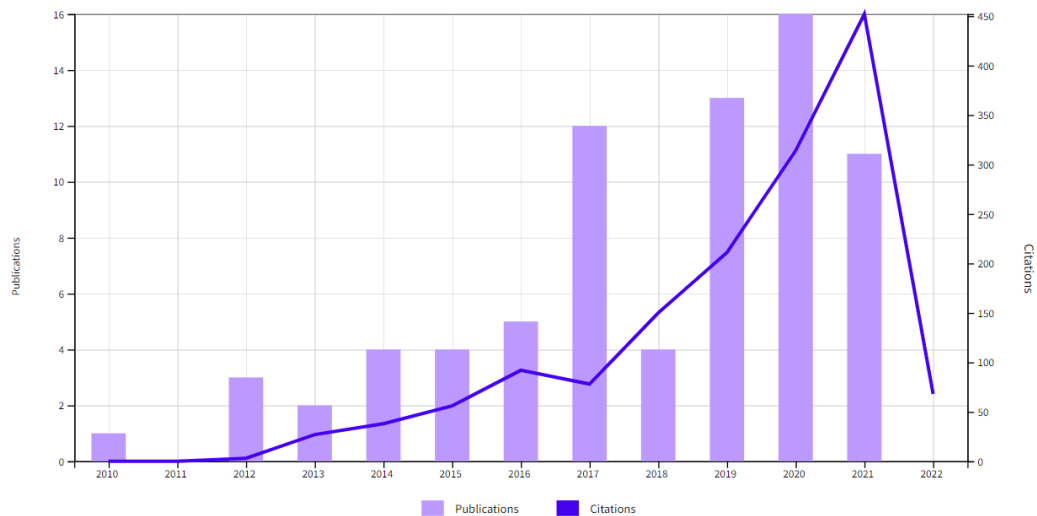
De los documentos considerados para el índice h , 19 han sido citados al menos 19 veces



Fuente: Filtración base de datos Scopus

De la ecuación de búsqueda se obtuvieron un total de 64 artículos filtrados en la base de datos Scopus, a los cuales se le obtuvo el índice H como lo muestra la figura 25, este valor significa que dentro de los 64 artículos, 19 de ellos han sido citados al menos 19 veces cada uno. De la base de datos se obtiene que estos 64 artículos fueron publicados desde el año 2010 hasta el año 2022.

Figura 26. Índice H para los artículos de la ecuación de búsqueda en Web of Science



Fuente: Filtración base de datos Web of Science

De la ecuación de búsqueda en base de datos Web of Science se obtiene un total de 75 artículos filtrados, los cuales poseen un índice H de 21, lo que significa que de los 75 artículos, 21 de ellos han sido citados al menos 21 veces cada uno. La figura 26 muestra que la mayoría de los artículos fueron publicados en el 2020 y que en el año 2021 la mayoría de ellos fueron citados.

Los índices H de la ecuación de búsqueda demuestran que en la Base de datos Web of Science hay un mayor número de artículos citados que en la base de datos Scopus, cabe destacar que la Web of Science arrojo mayor número de artículos filtrados dentro de la ecuación de búsqueda.

3.2.3 Índice de colaboración. Los valores necesarios para realizar los cálculos del índice de colaboración por año y para cada base de datos se realizó a partir de los datos de la filtración de la ecuación de búsqueda, para la base de datos Scopus se tiene en cuenta 64 de los 65 artículos filtrados, debido a que uno de ellos no posee información del autor, y para la base de datos Web of Science se tiene en cuenta todos los artículos filtrados.

Tabla 11. Valores para calcular el índice de colaboración para Scopus

AÑO	Scopus												ni	ji	IC
	NÚMERO DE AUTORES														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
2010	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	2,333
2011	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	11	5,500
2012	0	0	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	6	23	3,833
2013	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	4,000
2014	0	0	2	2	1	0	0	2	0	0	0	0	7	35	5,000
2015	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	4	22	5,500
2016	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	5	29	5,800
2017	0	0	5	0	1	1	0	1	0	0	0	0	8	34	4,250
2018	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	12	6,000
2019	0	0	0	0	2	1	1	1	0	1	0	0	6	41	6,833
2020	1	0	0	2	1	2	2	1	0	1	0	1	11	70	6,364
2021	0	0	0	1	5	1	1	0	0	0	0	0	8	42	5,250
Total												63	330	5,238	

Donde IC es el índice de colaboración, ji es el número de autores participantes en los trabajos, y ni es el número de artículos.

Fuente: Propia de la investigación

El índice de colaboración para la base de datos Scopus se calculó empleando la ecuación 3, de ella se obtiene que Scopus en el rango de tiempo establecido (De

2010 a 2021) tiene un índice de colaboración global de 5,238; valor que da a conocer que los artículos evaluados de la base de datos fueron escritos generalmente por alrededor de 5 autores, ya que en los 63 artículos evaluados se encontró una participación de 330 autores, cabe destacar que este valor es un promedio ya que algunos artículos manejan desde 1 a 12 autores (Ver tabla 11).

Tabla 12. Valores para calcular el índice de colaboración para Web of Science

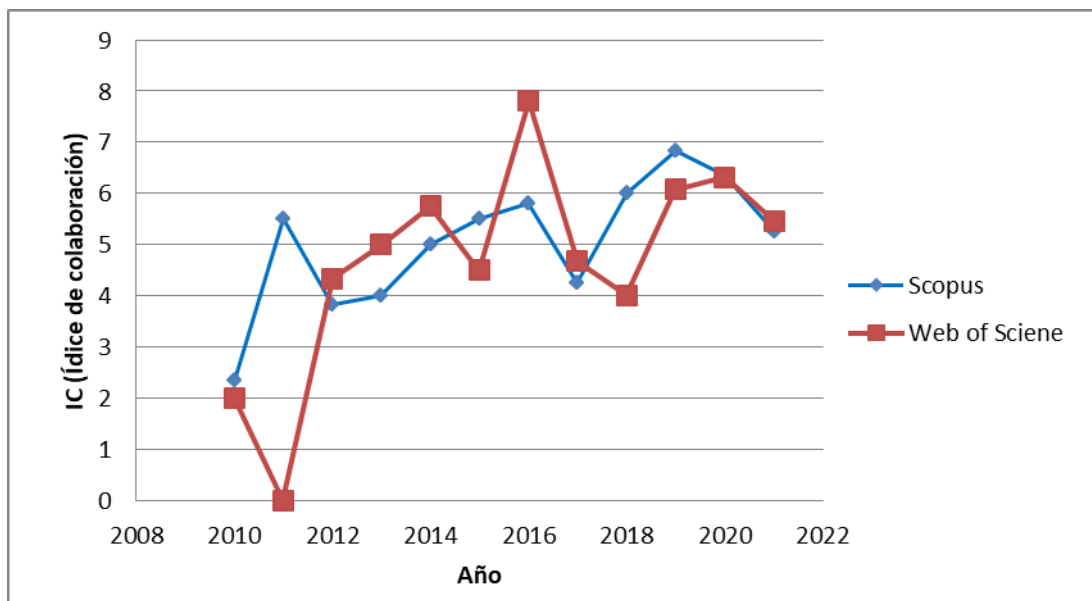
AÑO	Web of Science												<i>ni</i>	<i>ji</i>	<i>IC</i>
	NÚMERO DE AUTORES														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
2010	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2,000
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
2012	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	13	4,333
2013	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	10	5,000
2014	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	4	23	5,750
2015	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4	18	4,500
2016	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	1	0	5	39	7,800
2017	0	0	4	1	4	2	0	1	0	0	0	0	12	56	4,667
2018	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	4	16	4,000
2019	0	0	1	1	4	3	1	1	1	1	0	0	13	79	6,077
2020	0	1	2	2	1	3	2	2	0	2	0	1	16	101	6,313
2021	0	1	2	2	2	0	2	0	1	0	1	0	11	60	5,455
Total												75	417	5,560	

Donde *IC* es el índice de colaboración, *ji* es el número de autores participantes en los trabajos, y *ni* es el número de artículos.

Fuente: Propia de la investigación

El índice de colaboración para la base de datos Web of Science se calculó empleando la ecuación 3 al igual que en Scopus, se observa que el índice de colaboración global es de 5,560; valor que da a conocer que los artículos evaluados de la base de datos fueron escritos generalmente por 5 autores, este índice relaciona 75 artículos evaluados y sus 417 autores (Ver tabla 12). Al comparar el índice global de ambas bases de datos se encuentra que la base de datos Web of Science tiene un índice de colaboración mayor, lo que significa que los artículos contenidos en esta base de datos fueron escritos por un número mayor de autores.

Figura 27. Índice de colaboración a través del tiempo



Fuente: Propia de la investigación

La figura 27 muestra el comportamiento del índice de colaboración de cada base de datos desde el año 2010 hasta el 2021, se observa que en el año 2016 se presenta el mayor índice de colaboración en Web of Science valor que corresponde a 7,8, por otro lado en la misma base de datos para el año 2011 no hubieron artículos publicados acerca del tema, por ende el índice de colaboración es de 0; para la base de datos Scopus (de color azul en la gráfica), se observa un crecimiento del índice de colaboración hasta el año 2019 donde obtiene su valor máximo. En general se observa que los artículos que contemplan la producción de butanol a partir de biomasa lignocelulósica en las dos bases de datos fueron escritos por más de 1 autor, ya que aislando los valores de Web of Science en 2011 el resto de los valores no desciende la línea de 2 en el índice de colaboración, lo que representa que los autores del tema prefieren realizar trabajos conjuntos para la creación de nuevo conocimiento científico.

3.2.4 Factor de impacto (FI). Los valores necesarios para realizar los cálculos del factor de impacto para cada base de datos se obtuvieron de los artículos filtrados de la ecuación de búsqueda, cabe destacar que para ambas bases se emplearon dos grupos de años el primero de 2018 a 2019, muestra el impacto de las revistas en la actividad científica antes de la pandemia Covid-19, mientras el grupo de 2020-2021, muestra el impacto de las revistas durante los años de pandemia a nivel mundial, además se limitó a aquellas revistas con más de 3 artículos publicados que se encontraran dentro de los artículos filtrados de la ecuación de búsqueda, la tabla 12 muestra los valores y los cálculos del factor de impacto a partir de la ecuación 4.

Tabla 13. Valores para calcular el factor de impacto

REVISTA	Scopus						Web of Science					
	2018-2019			2020-2021			2018-2019			2020-2021		
	N	C	FI	N	C	FI	N	C	FI	N	C	FI
Bioresource technology	3	47	16	3	21	7	4	54	14	3	46	15
Bioenergy research	0	0	-	1	1	1	1	14	14	2	92	46
Biomass & bioenergy	2	29	15	1	3	3	3	47	16	2	16	8
Industrial crops and products	0	0	-	1	8	8	1	21	21	3	52	17
Applied energy	0	0	-	1	14	14	0	0	-	2	25	13
International journal of hydrogen energy	-	-	-	-	-	-	2	42	21	1	20	20

Donde *N* es el total de artículos, *C* es el número total de citas, y *FI* es el factor de impacto.

Fuente: Propia de la investigación

La tabla 13 muestra el panorama del impacto de las revistas más importantes dentro de la filtración a partir de la ecuación de búsqueda, de ella se observa que la base de datos Web of Science maneja un número mayor de revistas con más de tres artículos en los años de estudio (2018-2021), de igual forma el número de citas de los artículos es mayor en esta base de datos, lo que se ve reflejado en los valores del factor de impacto de cada revista; en la base de datos Scopus la revista con el mayor factor de impacto en el primer rango de tiempo (2018-2019) es la revista Bioresource technology, y para los años del segundo rango (2020-2021) es la revista Applied energy; en la base de datos Web of Science las revistas Industrial crops and products e international journal of hydrogen energy son las revistas con mayor factor de impacto para el primer rango de tiempo, para el segundo rango de tiempo la revista Bioenergy research es la que posee mayor factor de impacto posee; al comparar los valores de las revistas en los dos rangos de tiempo se obtiene que aquellas revistas con ambos valores en la base de datos Scopus disminuyen su factor de impacto en la actividad científica en los años de mayor pico de infección de la pandemia, a diferencia de la base de datos Web of Science en la cual algunas revistas aumentaron su factor de impacto y en aquellas donde disminuyó no fue un cambio radical, por ende la pandemia Covid-19 tuvo menor efecto en los investigadores que publicaron dentro de la base de datos Web of Science.

3.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE BUTANOL

Para interpretar los valores de los aspectos tecnológicos relacionados al butanol, se requiere conocer las siglas empleadas para clasificar los cultivos microbianos, las cuales se especifican en la tabla 14, donde los cultivos microbianos cambian de siglas dependiendo del país procedente y de la entidad que lo colecciona; la tabla 15 muestra el nombre y la colección del microorganismo que se utilizó para

la fermentación de cada artículo de investigación.

Tabla 14. Siglas de las diferentes colecciones de cultivos microbianos

COLECCIÓN DE CULTIVOS MICROBIANOS		
Sigla	País	Significado
DSM	Alemania	Colección Alemana de Microorganismos y cultivos celulares
CDBB	México	Colección Nacional de Cepas Microbianas y Cultivos celulares
ATCC	Estados Unidos	Colección Americana de Cultivos (American Type Culture Collection)
NRRL	Estados Unidos	Colección de Cultivos Mantenidos por ARS (Agricultural Research Service)
NCIM	India	Colección Nacional de Microorganismos Industriales
CCTCC	China	Centro de China para la Colección de Cultivos
TISTR	Tailandia	Instituto de Investigación Científica y Tecnológica de Tailandia
NBRC	Japón	Centro de Recursos Biológicos
NCIM	India	Laboratorio Nacional de química
NCBI	Estados Unidos	Centro Nacional para la Información Biotecnológica

A continuación se presentan los valores de los aspectos tecnológicos evaluados, los cuales corresponden a la producción, productividad y rendimiento de butanol para los artículos de investigación dentro de la filtración, a partir de la ecuación de búsqueda en las dos bases de datos.

Tabla 15. Aspectos tecnológicos relacionados al butanol

MÉTODO	SUSTRATO	AZÚCAR INICIAL (g/L)	CEPA	COLECCIÓN	EQUIPO DE FERMENTACIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCTIVIDAD	RENDIMIENTO	REFERENCIA
Fermentación IBE	Bagazo de caña de azúcar empaquetado en un cilindro de polímero	60	<i>Clostridium beijerinckii</i>	DSM 6423	Biorreactor de pared simple de vidrio de 7L con fondo de acero inoxidable (New Brunswick Bioflo & Celligen 310 Fermentor)	4,9 g/L	0,119 g/L*h	0,11 g/g	Ferreira dos santos & et al, 2022
Fermentación ABE	Mezcla de sustrato de salvado de trigo, bagazo de caña de azúcar y cáscara de naranja	69,23	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	ATCC 824	Matraz Erlenmeyer de 2L con una velocidad de agitación de 120 rpm bajo condiciones anaerobias	16,51 g/L	0,13 g/L*h	0,24 g/g	Mondal & et al, 2022
Fermentación ABE	Melaza y bagazo de caña de azúcar crudo	30	<i>Clostridium saccharoperbutylacetonicum</i>	DSM 14923	Biorreactores DASGIP Model Box de 300 mL (Eppendorf, Hamburgo, Alemania)	6,33 g/L	0,32 g/L*h	0,23 g/g	Zetty & et al, 2021
Fermentación ABE	Melaza e hidrolizado de hemicelulosa de bagazo de caña de azúcar	30-35	<i>Clostridium saccharoperbutylacetonicum</i>	DSM 14923	Reactor mezclador Hastelloy C-276, POPE Scientific Inc., Saukville, EE. UU.	2,9 g/L	0,04 g/L*h	0,15 g/g	Jimenez & et al, 2021
Fermentación IBE	Melaza y bagazo de caña de azúcar	6	<i>Clostridium beijerinckii</i>	DSM 6423	Reactor mezclador Hastelloy C-276 de 350L (POPE Scientific Inc., Saukville, EE. UU.)	7,9 g/L	0,11 g/L*h	0,28g/g	Ferreira dos santos & et al, 2021
Fermentación ABE	Melaza de caña de azúcar	50	<i>Clostridium beijerinckii</i>	TISTR 1461	Botellas de 1L con tapón de rosca	12,89 g/L	0,36 g/L*h	0,36 g/g	Narueworanon; Laopaiboon & Laopaiboon, 2021
Fermentación ABE	Bagazo caña de azúcar	42,4	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	NRRLB 591	Botellas de suero oscuro de 118mL con un volumen de trabajo de 20mL	5,1 g/L	0,04 g/L*h	0,15 g/g	Tondro & et al, 2020
Fermentación ABE	Bagazo caña de azúcar y melaza a 40 g/L de azúcares reductores totales	7,3	<i>Clostridium saccharoperbutylacetonicum</i>	DSM 14923	Botellas de 250mL con tapa roscada	10 g/L	0,14 g/L*h	0,25 g/g	Jimenez & et al, 2020
Fermentación IBE	Bagazo de caña de azúcar pretratado	60	<i>Clostridium beijerinckii</i>	DSM 6423	Botellas con tapón de rosca de 250mL	8,3 g/L	0,15 g/L*h	0,16 g/g	Ferreira dos santos & et al, 2020
Fermentación ABE	Hidrolizado de bagazo de caña	122	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	DSM 6228	Biorreactor (BioFlo 110, New Brunswick Co.)	9,1 g/L	0,4 g/L*h	0,4 g/g	Da & et al, 2019
Fermentación ABE	Hidrolizado de polvo de bagazo de caña	50	<i>CtΔack - adhE2 de Clostridium tyrobutyricum</i>	-	Biorreactor de lecho fibroso	12 g/L	0,20 g/L*h	0,25 g/g	Li & et al, 2019
Fermentación ABE	Hidrolizado hemicelulósico de bagazo de caña de azúcar suplementado con xilosa	50	<i>Clostridium saccharoperbutylacetonicum</i>	DSM 14923	Biorreactores de 300mL (Dasgip Box, DASGIP, Alemania)	5,8 g/L	0,30 g/L*h	0,29 g/g	Zetty & et al, 2019

Tabla 15. (Continuación)

MÉTODO	SUSTRATO	AZÚCAR INICIAL (g/L)	CEPA	COLECCIÓN	EQUIPO DE FERMENTACIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCTIVIDAD	RENDIMIENTO	REFERENCIA
Fermentación ABE	Hidrolizado de bagazo de caña	28	<i>Clostridium sporogenes</i>	NCIM 2337	Matraz Erlenmeyer de 150mL	4,11 g/L	0,057 g/L*h	0,173 g/g	Sivanarutselvi, Muthukumar & Velan, 2017
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	35	<i>Clostridium beijerinckii</i> CC101 con sobreexpresiones adicionales de ald y ctf AB	NCIM 8052	Botella de suero de 125mL	11,3 g/L	0,23 g/L*h	0,38 g/g	Lu & et al, 2017
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	32	<i>Clostridium acetobutílico</i>	ATCC 824	Botellas con tapa roscada de 250mL	7,68 g/L	0,064 g/L*h	0,25 g/g	Li & et al, 2017
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	28	<i>Clostridium sporogenes</i>	NCIM 2337	Matraz Erlenmeyer de 150 ml	4,11 g/L	0,057 g/L*h	0,173 g/g	Singaravelu, Karuppan & Manickam, 2017
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	41	<i>Clostridium acetobutylicum</i> XY16	CCTCC No. M 2010011	Fermentador de vidrio de 500mL	9,3 g/L	0,155 g/L*h	0,22 g/g	Kong & et al, 2016
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	30	<i>Clostridium beijerinckii</i>	DSM 6422	Reactor de lecho fijo	3,38 g/L	0,035 g/L*h	0,165 g/g	Travaini, Barrado & Bolado Rodríguez, 2016
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	20	<i>Clostridium acetobutylicum</i> GX01	DSM 1731	Matraz de 500mL y un biorreactor de 3L	14,17 g/L	0,24 g/L*h	0,24 g/g	Pang & et al, 2016
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	40,66	<i>Clostridium beijerinckii</i>	NCIMB 8052	Botellas anaeróbicas de vidrio de 250mL (Haimen Huakai experiment glass instrument Co., Ltd, Haimen, China	6,86 g/L	0,071 g/L*h	0,27 g/g	Su & et al, 2015
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	53	<i>Clostridium acetobutylicum</i> XY16	CCTCC No. M 2010011	Fermentador de 5L (Bioflo 110, EE. UU.)	11,68 g/L	0,28 g/L*h	0,35 g/g	kong & et al, 2015
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	20	<i>Clostridium thermocellum</i> cepa TCW1 16S	NCBI EU916270	-	2,29 g/L	0,032 g/L*h	0,11 g/g	Cheng & et al, 2012

La tabla 15 da a conocer 22 artículos de investigación sobre la producción de butanol, presentando no solo los aspectos tecnológicos a evaluar, si no también especificaciones sobre el azúcar inicial de la fermentación en el proceso, el sustrato empleado y el equipo donde se realiza la fermentación; con respecto a la fermentación empleada se observó que el 13,6% de los artículos se basan en una fermentación IBE, las cuales se presentan a partir del año 2020, como resultado del latente interés de comercializar la mezcla IBE (Isopropanol-Butanol-Etanol) como combustible para automóviles, esta alternativa ha sido poco estudiada y se presenta mayoritariamente artículos de investigación con fermentación ABE (Acetona-Butanol-Etanol).

A partir de la tabla 15 se realizaron diferentes gráficas de dispersión para conocer la correlación entre los diferentes aspectos tecnológicos evaluados, estas gráficas muestran la relación del azúcar inicial en la fermentación y aspectos como la producción, productividad y rendimiento de butanol en el proceso; además se calculó la correlación de estos aspectos y el valor P en el software Minitab.

Tabla 16. Valores de correlación de Pearson y Valor P

Correlaciones

	Azúcar inicial (g/L)	Producción (g/L)	Productividad (g/L*h)
Producción (g/L)	0,244*		
	0,273**		
Productividad (g/L*h)	0,500	0,536	
	0,018	0,010	
Rendimiento (g/g)	0,351	0,617	0,758
	0,109	0,002	0,000

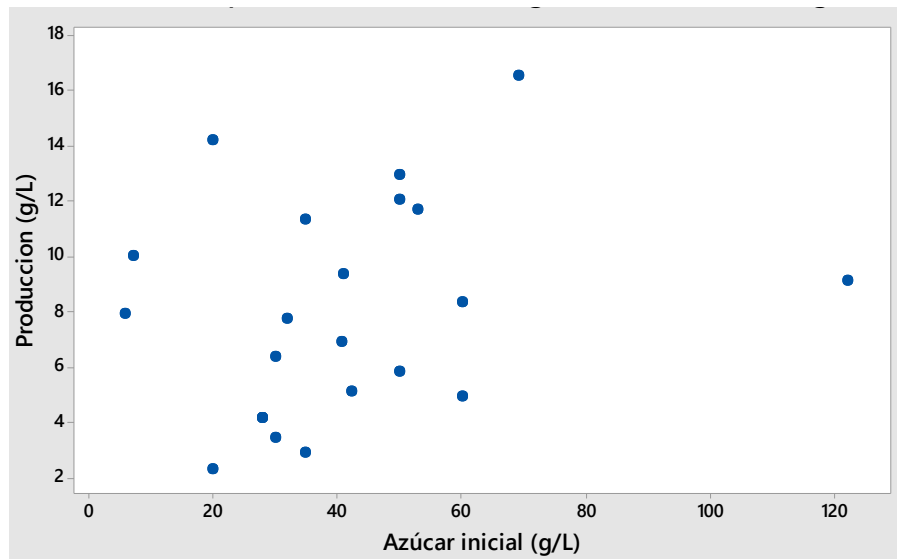
Contenido de la celda

*Correlación de Pearson

** Valor p

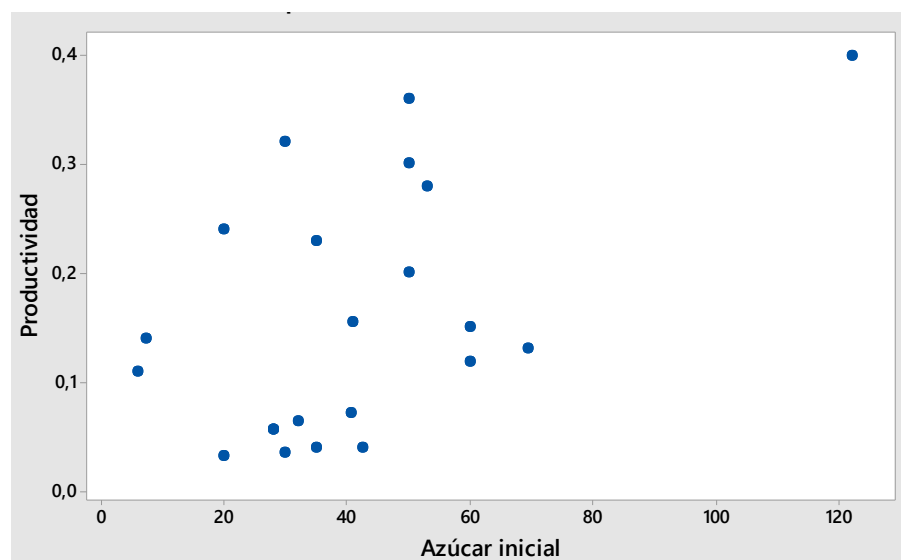
Para todos los casos de correlación se empleó un α de 0.05 para comparar el valor P en las correlaciones.

Figura 28. Dispersión de azúcar inicial y producción



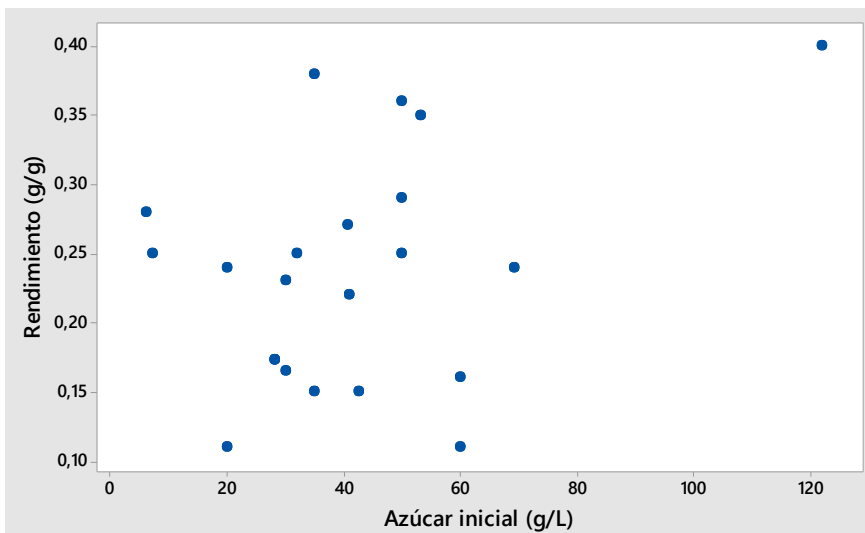
La relación del azúcar inicial y la producción de butanol se presenta en la figura 28, la cual muestra un dispersión de los valores (ilustrado por puntos) sin una tendencia clara, basados en el valor de la correlación de Pearson (0,244) se obtiene que existe una relación baja entre el azúcar inicial y la producción de butanol, el valor P (0,273) que es mayor a alfa (Valor $P > \alpha$) representa que la correlación no es estadísticamente significativa, por lo cual se deduce que la cantidad de azúcar inicial debe ser óptima dependiendo del microorganismo empleado y las variables del proceso.

Figura 29. Dispersión de azúcar inicial y productividad



La figura 29 muestra la dispersión de los valores de la productividad en relación al azúcar inicial, los valores no muestran una tendencia clara, pero el valor de la correlación de Pearson (0,5) indica que existe una relación moderada entre el azúcar inicial y la productividad, el valor P (0,018) es menor que el valor de alfa por ende el azúcar inicial y la productividad de butanol están relacionadas, donde al elevar el contenido del azúcar inicial se espera que la productividad también aumente.

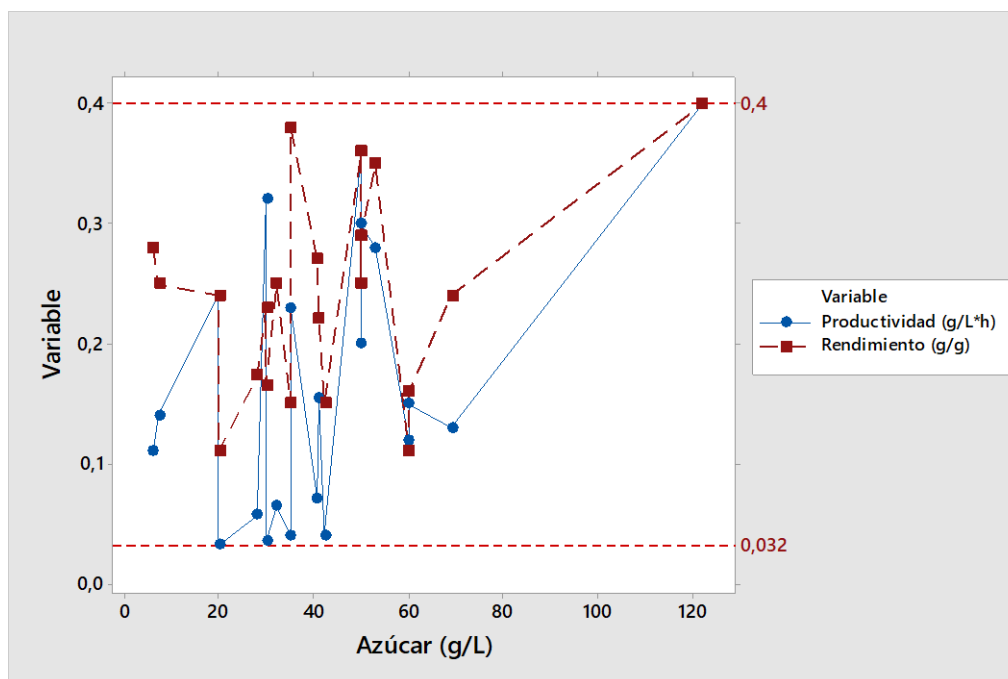
Figura 30. Dispersión de azúcar inicial y rendimiento



La figura 30 muestra la dispersión de los valores del rendimiento de butanol en relación al azúcar inicial, los valores no muestran una tendencia clara, pero el valor de la correlación de Pearson (0,351) indica que existe una relación baja entre el azúcar inicial y el rendimiento, el valor P (0,109) es mayor que el valor de alfa por ende el azúcar inicial y el rendimiento de butanol no están relacionadas entre sí.

Con respecto a la correlación de la producción de butanol y productividad, producción de butanol y rendimiento, productividad y rendimiento se observa a través de los datos de la tabla 16, que existe una relación significativa entre los grupos, debido principalmente a que todos se calculan teniendo en cuenta la concentración final de butanol en cada proceso.

Figura 31. Dispersión de parametros conjuntos



La figura 31 muestra la dispersión de la productividad y el rendimiento en conjunto, en la cual se observa que los valores de la productividad son los que se acercan al límite inferior que corresponde a un valor de 0,032 g/L*h, mientras que los valores del rendimiento se acercan al límite superior que corresponde a 0,4 g/g; cabe destacar que el último punto que se muestra en la figura es el que mejores resultados presenta en los dos parámetros empleando un valor de azúcar inicial de 120 g/L, las condiciones en las cuales se lograron estos valores se observa en la tabla 18.

Tabla 17. Valores del coeficiente de variación, máximos y mínimos

Estadísticas

Variable	CoefVar	Mínimo	Máximo
Productividad (g/L*h)	71,30	0,0320	0,4000
Rendimiento (g/g)	35,54	0,1100	0,4000

La tabla 17 presenta los coeficientes de variación de los dos parámetros analizados, donde el valor para la productividad es de 71,3 lo que indica que existe una gran dispersión en los datos analizados, mientras que el valor para el rendimiento es de 35,54 mostrando que la dispersión de los datos no es tan extrema.

Tabla 18. Condiciones de producción de butanol

MÉTODO	SUSTRATO	PRETRATAMIENTO	CEPA	COLECCIÓN	CONDICIONES INICIALES	SUPLEMENTACIÓN DE NUTRIENTES (g/L en solución final)	PRODUCTIVIDAD (g/L*h)	RENDIMIENTO (g/g)	REFERENCIA
Fermentación ABE	Hidrolizado de bagazo de caña (caña de azúcar con una humedad inicial del 50%)	25% (p/p) de bagazo en ácido sulfúrico al 1% (v/v) en 30 minutos	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	DSM 6228	Azúcar: 122 g/L; tiempo de fermentación: 80-84 h; temperatura: 37 °C; agitación: 50 rpm	Extracto de lavadura: 1; MnSO ₄ : 0,01; MgSO ₄ : 0,2; KH ₂ PO ₄ : 0,5; K ₂ HPO ₄ : 0,5; acetato de sodio: 0,01; FeSO ₄ ·7H ₂ O: 0,01	0,4	0,4	Da & et al, 2019
Fermentación ABE	Hidrolizado de bagazo de caña	-	<i>Clostridium saccharoperbutylacetonicum</i>	DSM 14923	Azúcar: 50 g/L; tiempo de fermentación: 24 h; temperatura: 37 °C	Extracto de lavadura: 5; KH ₂ PO ₄ : 0,75; K ₂ HPO ₄ : 0,75; NaCl: 1; MgSO ₄ ·7H ₂ O: 0,4; MnSO ₄ ·7H ₂ O: 0,4; FeSO ₄ ·7H ₂ O, 0,01; CH ₃ COONH ₄ : 4,3; ácido paraaminobenzoico: 0,1; biotina: 0,001	0,3	0,29	Zetty & et al, 2019
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	El bagazo se secó a 50 °C durante la noche, tamaño de partícula de malla de 40. Realizaron varios pretratamientos empezando con ácido sulfúrico diluido y ácido clorhídrico, hidróxido de sodio.	<i>Clostridium acetobutylicum</i> GX01	DSM 1731	Azúcar: 20 g/L; tiempo de fermentación: 24 h; temperatura: 37 °C	Urea: 2; FeSO ₄ : 0,01 (pH 6.5)	0,24	0,24	Pang & et al, 2016
Fermentación IBE	Bagazo de caña de azúcar empaquetado en un cilindro de polímero (superficie del bagazo 0,63 m ² /g y un volumen de poros de 1,85 x 10 ⁻³ cm ³ /g) y medio (60 g/L de glucosa, 1 g/L de extracto de levadura)	-	<i>Clostridium beijerinckii</i>	DSM 6423	Azúcar: 60 g/L; tiempo de fermentación: 138 h; temperatura: 35 °C; agitación: 50 rpm	-	0,119	0,11	Ferreira dos santos & et al, 2022
Fermentación ABE	Bagazo de caña de azúcar	pretratado con 20 ml de solución alcalina (incluyendo 15 g/L de NaOH y 2 g/L de H ₂ O ₂) a 120 °C durante 20 min	<i>Clostridium thermocellum</i> cepa TCW1 165	NCBI EU916270	-	-	0,032	0,11	Cheng & et al, 2012

La tabla 18 muestra cinco de los artículos analizados en el estudio, en donde las tres primeras investigaciones presentan los mejores valores para productividad y rendimiento, mientras que las dos últimas filas muestran los valores más bajos; la tabla muestra los pretratamientos empleados sobre el sustrato en las investigaciones y la suplementación de nutrientes que se realiza sobre el medio, es así como aunque los pretratamientos son importantes para el aumentar la accesibilidad enzimática y reducir los contenidos de hemicelulosa y lignina, no aseguran valores altos en la productividad y rendimiento de butanol como se observa en el estudio número cinco de la tabla 18.

Mientras que la suplementación de nutrientes parece afectar los valores finales, ya que las investigaciones que no desarrollaron una suplementación obtuvieron los valores más bajos. Por otro lado en las condiciones iniciales se encuentra que el estudio con mayor cantidad de azúcar inicial y con agitación en la fermentación obtuvo los valores más altos en los parámetros antes mencionados, debido presuntamente a que a mayor cantidad de azúcar mayor consumo por parte de los microorganismos generando mayor cantidad de butanol, además gracias a los pretratamientos se puede ver disminuido la producción de inhibidores dentro de la fermentación, la aireación en la fermentación para microorganismos anaerobios como los *Clostridium* se realiza para mejorar la mezcla del medio.

La tabla 19 muestra la producción de etanol a partir de bagazo de caña de azúcar, los valores de rendimiento y productividad se calcularon a partir de datos de la investigación empleando las ecuaciones 5 y 6 (Santoro & *et al*, 2021).

Tabla 19. Parámetros en la producción de etanol

PARÁMETRO	CICLO				
	1	2	3	4	5
Glucosa inicial (g/L)	81,40	86,50	113,70	123,80	130,60
Consumo de glucosa (%)	59,50	99,50	99,50	99,40	98,90
Etanol final (g/L)	19,50	35,50	44,50	50,10	48,80
Consumo de glucosa (g)	48,43	86,07	113,13	123,06	129,16
Tiempo de fermentación (h)	10	8	10	8,3	5,83
Volumen de fermentación (L)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Rendimiento (g/g)	0,40	0,41	0,39	0,41	0,38
Productividad (g/L*h)	2,79	6,34	6,36	8,62	11,96

Al comparar el rendimiento de butanol y etanol se logra observar que los valores son similares, ya que estos se calculan al relacionar la cantidad de butanol o etanol con la cantidad de glucosa consumida por los microorganismos; en cambio los valores de la productividad son distintos, siendo los valores para etanol más altos que los de butanol, ya que el volumen y el tiempo de fermentación es menor en el etanol; es por ello que las investigaciones para la producción de butanol a partir del bagazo de caña de azúcar poseen buenos rendimientos mientras que su productividad es baja.

7. CONCLUSIONES

Los residuos lignocelulósicos más empleados para la obtención de butanol en los estudios publicados son tallos, paja, residuos de cosecha y rastrojo de cultivos como maíz, soya, arroz y caña de azúcar, ya que son una fuente renovable, abundante y barata en ciertas zonas de producción.

Las investigaciones publicadas en las bases de datos sobre la producción de butanol a partir de bagazo de caña de azúcar inician alrededor del año 2012, con instituciones como Novozymes América latina y Brazilian center for research in energy and materials (CNPEN), empresas de Brasil que relacionan sus investigaciones con universidades como la universidad estatal de Ohio Estados unidos; los países con mayores investigaciones son Brasil, India, Estados unidos y China.

La co-ocurrencia de términos desarrollada en el software VOSviewer da a conocer de forma general que para la producción de butanol a partir de bagazo de caña de azúcar, se realiza en la mayoría de investigaciones fermentaciones de tipo ABE y se emplean *Clostridium* como microorganismos fermentativos; aunque al analizar detenidamente los artículos filtrados con la ecuación de búsqueda se logra obtener otro tipo de fermentación empleada, la cual es la fermentación IBE.

Los mejores valores para rendimiento y productividad los genero una fermentación ABE sobre un hidrolizado de bagazo de caña de azúcar con el *Clostridium acetobutylicum* DSM 6228 como microorganismo fermentador.

Al comparar el rendimiento y la productividad de butanol con la del etanol de segunda generación, se observa que el método de producción que contempla una fermentación ABE posee buenos rendimientos (0,4 g/g), mientras que la productividad es baja (0,4 g/L*h), dando a conocer que se debe mejorar las condiciones en el cual se desarrollar la fermentación.

8. RECOMENDACIONES

Ampliar la visión sobre el uso de residuos lignocelulósicos generados en cultivos, como materias primas de interés para su transformación en compuestos químicos de alto valor añadido, cambiando la forma en que se tratan actualmente, ya que muchas veces se desperdician al no realizar ningún tratamiento.

Llevar a cabo ensayos en planta piloto utilizando la metodología descrita en el artículo que posee los mejores valores para los parámetros de rendimiento y productividad con fermentación ABE.

Desarrollar nuevos ensayos empleando las metodologías descritas para las fermentaciones IBE, ya que los productos obtenidos mediante este proceso se pueden llegar a utilizar como mezclas de biocombustibles sin necesidad de una separación como sucede en la fermentación ABE.

Analizar los costos de la producción de butanol a partir de bagazo de caña de azúcar en las fermentaciones ABE e IBE, para comparar cual fermentación es viable dentro de una planta piloto.

BIBLIOGRAFÍA

ALOKIKA, *et al.* Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. En: *International Journal of Biological Macromolecules*. Editorial Elsevier, Febrero, 2021, vol. 169, p. 564-582. [Consultado: 25 de noviembre de 2021]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>.

BOSCH JIMENEZ, Carlos. Simulación del proceso de producción n-butanol por la vía Oxosíntesis [En línea]. Trabajo de investigación Ingeniería Química. Sevilla España: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Departamento ingeniería química y ambiental, 2019, p. 15. [Consultado: 27 de Abril de 2022]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/92237/fichero/TFG-2237-BOSCH.pdf>.

CASCÓN-KATCHADOURIAN, Jesús, *et al.* Análisis bibliométrico de la Revista Española de Documentación Científica desde su inclusión en la Web of Science (2008-2018). En: *Revista Española de Documentación Científica* [En línea]. Julio-Septiembre, 2020. p. 1-16 [Consultado: 19 de Abril de 2022]. DOI <https://doi.org/10.3989/redc.2020.3.1690>.

CEBA ALCÓN, Guillermo, Análisis técnico-económico de la producción de butanol a partir de bioetanol. Trabajo de investigación Ingeniería Industrial. Sevilla-España: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, 2018, p. 107.

CHENG, Chieh-Lun, *et al.* Biobutanol production from agricultural waste by an acclimated mixed bacterial microflora. En: *Applied Energy* [En línea]. Taiwan: Editorial Elsevier Ltd, Diciembre, 2012, vol. 100, p. 3-9 [Consultado: 31 de Mayo de 2022]. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.042>.

DA CONCEIÇÃO GOMES, Absai, *et al.* Acetone–butanol–ethanol fermentation from sugarcane bagasse hydrolysates: Utilization of C5 and C6 sugars. En: *Electronic Journal of Biotechnology* [En línea]. Brasil: Editorial Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Noviembre, 2019, vol. 42, p. 16-22 [Consultado: 25 de mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.10.004>.

DA SILVA TRINDADE, Wagner Roberto & DOS SANTOS, Rogério. 1D modeling of SI engine using n-butanol as fuel: Adjust of fuel properties and comparison between measurements and simulation. En: *Energy Conversion and Management* [En línea].

Brasil: Editorial Elsevier Ltd., Febrero, 2018, vol. 157, p. 224–238 [Consultado: 25 de Febrero de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.003>.

ESCORCIA OTALORA, Tatiana Alexandra. El análisis bibliométrico como herramienta para el seguimiento de publicaciones científicas, tesis y trabajos de grado [En línea]. Trabajo de investigación microbióloga industrial. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, Departamento de microbiología industrial, 2008. p. 61 [Consultado: 28 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8212/tesis209.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

FERREIRA DOS SANTOS VIERA, Carla, *et al.* Acetone-free biobutanol production: Past and recent advances in the Isopropanol-Butanol-Ethanol (IBE) fermentation. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Campinas Brasil: Editorial Elsevier Ltd, Septiembre, 2019, vol. 287, p. 1-13 [Consultado: 21 de Abril de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121425>.

FERREIRA DOS SANTOS VIERA, Carla, *et al.* Isopropanol-butanol-ethanol (IBE) production in repeated-batch cultivation of *Clostridium beijerinckii* DSM 6423 immobilized on sugarcane bagasse. En: *Fuel* [En línea]. Campinas Brasil: Editorial Elsevier Ltd, Marzo, 2020, vol. 263, p. 1-7 [Consultado: 21 de Abril de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116708>.

FERREIRA DOS SANTOS VIERA, Carla, *et al.* Isopropanol-butanol-ethanol production by cell-immobilized. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Campinas Brasil: Editorial Elsevier Ltd, Enero, 2022, vol. 344, parte B, p. 1-10 [Consultado: 03 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126313>.

FERREIRA DOS SANTOS VIERA, Carla, *et al.* Sugarcane bagasse hydrolysates as feedstock to produce the isopropanol-butanol-ethanol fuel mixture: Effect of lactic acid derived from microbial contamination on *Clostridium beijerinckii* DSM 6423. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Campinas Brasil: Editorial Elsevier Ltd, Enero, 2021, vol. 319, p. 1-8 [Consultado: 04 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124140>.

GÓMEZ FUENTES, María del Carmen. Notas del curso Base de Datos. Distrito Federal-México: Editorial Casa abierta al tiempo, 2013. p. 198. ISBN 978-607-477-880-9.

GONZALEZ GUERRA, Jonattan Smith. Síntesis, funcionalización y caracterización de catalizadores tipo hidrotalcita por el método de coprecipitación para ensayos en reacción de transesterificación [En línea]. Montería: Universidad de Córdoba. Facultad de ciencias básicas. Programa de química. 2020. p. 71. [Consultado: 02 de Mayo de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3086/gonzalezguerrajonattansmith.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

HERNÁNDEZ GALINDO, Celia. Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta [En línea]. Trabajo de investigación para optar por el título de master universitario en biotecnología alimentaria. España. Universidad de Oviedo. Julio, 2017, p. 1-93 [Consultado: 03 de Mayo de 2022]. Disponible en: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43613/TFM_CeliaHernandezGalindo.pdf?sequence=6&isAllowed=y.

JIMÉNEZ CHACÓN, Suranny, et al. Enabling butanol production from crude sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysate by batch-feeding it into molasses fermentation. En: *Industrial Crops & Products* [En línea]. Brasil: Elsevier Ltd, Noviembre, 2020, vol. 155, p. 1-6 [Consultado: 04 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112837>.

JIMÉNEZ CHACÓN, Suranny, et al. Three-stage repeated-batch immobilized cell fermentation to produce butanol from non-detoxified sugarcane bagasse hemicellulose hydrolysates. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Brasil: Elsevier Ltd, Febrero, 2021, vol. 321, p. 1-9 [Consultado: 04 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124504>.

KONG, Xiangping, et al. Biobutanol production from sugarcane bagasse hydrolysate generated with the assistance of gamma-valerolactone. En: *Process Biochemistry* [En línea]. China: Editorial Elsevier Ltd, Octubre, 2016, vol. 51, nro 10, p. 1538-1543 [Consultado: 27 de Mayo de 2022]. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2016.06.013>.

KONG, Xiangping, et al. Efficient acetone–butanol–ethanol production (ABE) by *Clostridium acetobutylicum* XY16 immobilized on chemically modified sugarcane bagasse. En: *Bioprocess Biosyst Eng* [En línea]. Berlín: Springer, Febrero, 2015, p. 1365–1372 [Consultado: 27 de Mayo de 2022]. DOI [DOI 10.1007/s00449-015-1377-8](https://doi.org/10.1007/s00449-015-1377-8).

LADINO LEMUS, Johana Marcela. Evaluación bibliométrica y temática de la revista colombiana internacional 2011-2020 [En línea]. Trabajo de grado para optar el título de

Profesional en Ciencia de la Información, Bibliotecólogo y Archivista. Bogotá: Pontificia universidad javeriana. Facultad de comunicación y lenguaje. Departamento ciencia de la información. Bibliotecología y archivística. 2021. p. 1-109. [Consultado: 20 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/54367/Johana%20Marcela%20Ladino%20Lemus%20-%20Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

LI, Jing, *et al.* n-Butanol production from lignocellulosic biomass hydrolysates without detoxification by *Clostridium tyrobutyricum* Δ ack-adhE2 in a fibrous-bed biorreactor. En: *Bioresource Technology* [En línea]. China: Editorial Elsevier Ltd, Octubre, 2019, vol. 289, p. 1-7 [Consultado: 26 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121749>.

LÓPEZ QUIJANO, Claudia Samantha. El método de termólisis como tratamiento de residuos urbanos. Ingeniería química industrial. [En línea]. México D.C. Instituto politécnico Nacional: Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, 2016, p. 41 [Consultado: 20 de Enero del 2022]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/20940/25-1-16906.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

LI, Hailong, *et al.* Enhanced enzymatic hydrolysis and acetone-butanol-ethanol fermentation of sugarcane bagasse by combined diluted acid with oxidate ammonolysis pretreatment. En: *Bioresource Technology* [En línea]. China: Editorial Elsevier Ltd, Marzo, 2017, vol. 228, p. 257-263 [Consultado: 26 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.119>.

LU, Congcong, *et al.* Enhanced robustness in acetone-butanol-ethanol fermentation with engineered *Clostridium beijerinckii* overexpressing adhE2 and ctfAB. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Estados Unidos: Editorial Elsevier Ltd, Noviembre, 2017, vol. 243, p. 1000-1008 [Consultado: 26 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.043>.

MÁLAGA SABOGAL, Lúcia. Indicadores bibliométricos en medicina de las instituciones peruanas (2009 – 2011) [En línea]. Trabajo de investigación Licenciada en Bibliotecología y Ciencias de la Información. Lima- Perú: Universidad nacional mayor de san marcos, Facultad de letras y ciencias humanas, E.A.P. de Bibliotecología y Ciencias de la Información, 2014, p. 94 [Consultado: 02 de Marzo de 2022]. Disponible en: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/3773/M%c3%a1laga_sl.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

MAYANK, Rahul; RANJAN, Amrita y MOHOLKAR, Vijayanand. Mathematical models of ABE fermentation: review and analysis. En: *Critical Reviews in Biotechnology* [en línea]. India: Informa Healthcare USA, Inc., Agosto, 2012, p. 419-447 [Consultado: 31 de enero de 2022]. DOI <https://doi-org.acceso.unicauca.edu.co/10.3109/07388551.2012.726208>. ISSN: 0738-8551.

MINAGRICULTURA. Cadena caña de azúcar: Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. 30 Junio 2020 [Consultado: 23 de Noviembre de 2021]. Disponible en: <https://sioc.minagricultura.gov.co/CanaAzucar/Documentos/2020-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.

MINAGRICULTURA. Agronet: Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano. Bogotá. 26 Diciembre 2018 [Consultado: 23 de Noviembre de 2021].

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, Colombia, 2011. p. 125. [Consultado el 20 de Enero del 2022]. ISBN: 978-958-8504-59-9.

MONDAL, Subhadeep, *et al.* Saccharification of lignocellulosic biomass using an enzymatic cocktail of fungal origin and successive production of butanol by *Clostridium acetobutylicum*. En: *Bioresource Technology*. [En línea]. India: Elsevier Ltd, Enero, 2022, vol. 343, p. 1-10 [Consultado: 03 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126093>.

MORALES RODRIGUEZ, Ricardo, *et al.* Acetone, Butanol, Ethanol and, Xylitol Production Through a Biorefnery Platform: An Experimental & Simulation Approach. En: *Waste and Biomass Valorization* [En línea]. Febrero, 2021, p. 4915-4930 [Consultado: 04 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01327-4>.

MUÑOZ MUÑOZ, Deyanira; PANTOJA MATTA, Alvaro Javier y GUATIN GUARIN, Milton Fernando. Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería. En: *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, Artículos de Investigación Científica y Tecnológica*, Julio – Diciembre, 2014, vol. 12, nro. 2, p. 10-19 [23 de Noviembre de 2021]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612014000200002.

NARUEWORANON, Patthranit; LAOPAIBOON, Lakkana y LAOPAIBOON, Pattana. Capability of Immobilized *Clostridium beijerinckii* TISTR 1461 on Lotus Stalk Pieces to Produce Butanol from Sugarcane Molasses. En: *Processes* [En línea]. Tailandia: Editorial Copyright, Marzo, 2021, vol. 9, nro. 4, p. 1-16 [Consultado: 28 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.3390/pr9040573>.

PANG, Zong-Wen, *et al.* Butanol production employing fed-batch fermentation by *Clostridium acetobutylicum* GX01 using alkali-pretreated sugarcane bagasse hydrolysed by enzymes from *Thermoascus aurantiacus* QS 7-2-4. En: *Bioresource Technology* [En línea]. China: Editorial Elsevier Ltd, Julio, 2016, vol. 212, p. 82-91 [Consultado: 27 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.013>.

PINEDA OSPINA, Diana Lorena. Análisis bibliométrico para la identificación de factores de innovación en la industria alimentaria. En: *AD-MINISTER*. Medellín-Colombia: Julio-Diciembre, 2015, nro. 25, p. 95-126. ISSN 1692-0279 e ISSN 2256-4322.

QUEZADA PALACIOS, Josué Eduardo. Análisis de rendimientos de una línea de producción de bebidas carbonatadas. Trabajo de investigación Ingeniería Mecánica Industrial. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, 2016. p. 212.

ROCHÓN, Eloísa, *et al.* Bioprocess intensification for isopropanol, butanol and ethanol (IBE) production by fermentation from sugarcane and sweet sorghum juices through a gas stripping-pervaporation recovery process. En: *Fuel* [En línea]. Uruguay: Editorial Elsevier, Diciembre de 2020, vol. 281, p. 1-10 [Consultado: 18 de abril de 2022]. DOI <https://doi-org.acceso.unicauca.edu.co/10.1016/j.fuel.2020.118593>.

RUEDA CASTILLO, Oliver. Las noticias falsas en tiempos de covid-19: la importancia del acceso a la información y su inhibición por la alfabetización informacional en estudiantes universitarios de san Luis Potosí. En: *TLATEMOANI Revista Académica de Investigación* [En línea]. España: Editorial Eumed.net, Agosto, 2021, vol. 12, nro. 37, p. 111-134. [Consultado: 18 de enero de 2022]. ISSN-e 1989-9300.

RUEDA CLAUSEN, Christian Federico; Cristina VILLA ROEL, Cristina y RUEDA CLAUSEN, Christian Eduardo. Indicadores bibliométricos: origen, aplicación, contradicción y nuevas propuestas. En: *MedUNAB* [En línea]. Bucaramanga-Colombia: Mayo de 2005, vol. 8, nro. 1, p. 29-36 [Consultado: 2 de Marzo de 2022]. Disponible en: <http://editorial.unab.edu.co/revistas/medunab>.

RUIZ POMEDA, Alicia; ÁLVAREZ PEREGRINA, Cristina y POVEDANO MONTERO, Francisco Javier. Bibliometric study of scientific research on optometric visual therapy. En: *Journal of Optometry*. Madrid, Spain: Editorial Elsevier España, Mayo, 2020, vol. 13, nro. 3, p. 191-197. [Consultado: 1 de Marzo de 2022]. DOI: <https://doi-org.acceso.unicauca.edu.co/10.1016/j.optom.2019.12.007>.

SANDOVAL HERRERA, Juan Andrés. Balances de materia y energía aplicados a la investigación. Bogotá: Editorial Fundación Universidad de América, 2021, p. 158 [Consultado: 20 de Septiembre de 2022]. DOI <https://doi.org/10.29097/9789585303058>

SANTORO, Catherine, et al. Second-generation ethanol process for integral use of hemicellulosic and cellulosic hydrolysates from diluted sulfuric acid pretreatment of sugarcane bagasse. En: *Fuel*. Campinas, Brasil: Editorial Elsevier Ltd., Noviembre, 2021, vol. 304, p. 1-9. [Consultado: 20 de Septiembre de 2022]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121290>.

SANZ FERRERUELA, Javier. Análisis Tecno-Económico del proceso de producción de butanol a partir de biomasa lignocelulósica por vía termoquímica. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Trabajo de investigación Ingeniería Industrial, 2016, p. 152.

SCOPUS. [Consultado: 12 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www-scopus-com.acceso.unicauca.edu.co/results/results.uri?cc=10&sort=plf-f&src=s&st1=production+of+butanol+from+sugarcane+bagasse&nlo=&nlr=&nls=&sid=f230fdda2ab2b5adc9c2b25c6df517b4&sot=b&sdt=b&sl=59&s=TITLE-ABS-KEY%28production+of+butanol+from+sugarcane+bagasse%29&ss=plf-f&ps=r-f&editSaveSearch=&origin=resultslist&zone=resultslist>

SILVA DANTAS, Ercília Regina, *et al.* Biochemical conversion of sugarcane bagasse into the alcohol fuel mixture of isopropanol-butanol-ethanol (IBE): Is it economically competitive with cellulosic ethanol?. En: *Bioresource Technology* [En línea]. Campinas-Brasil: Editorial Elsevier Ltd, Octubre, 2020, vol. 314, p. 1-12 [Consultado: 20 de abril de 2022] DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123712>.

SINGARAVELU, Sivanarutselvi; KARUPPAN, Muthukumar y MANICKAM, Velan. Studies on the effect of hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse for biobutanol Production. En: *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* [En línea]. India: Taylor & Francis Group, Octubre, 2017, vol. 39, nro. 16, p. 1771–1777 [Consultado: 25 de Mayo de 2022]. DOI

<https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1359705>.

SU, Haifeng, *et al.* A biorefining process: Sequential, combinational lignocellulose pretreatment procedure for improving biobutanol production from sugarcane bagasse. En: *Bioresource Technology*. Editorial Elsevier, Julio, 2015, vol. 187, p. 149-160 [Consultado: 25 de Noviembre de 2021]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.107>.

TRAVAINI, Rodolfo; BARRADO, Enrique y BOLADO RODRÍGUEZ, Silvia. Effect of ozonolysis parameters on the inhibitory compound generation and on the production of ethanol by *Pichia stipitis* and acetone-butanol-ethanol by *Clostridium* from ozonated and water washed sugarcane bagasse. En: *Bioresource Technology* [En línea]. España: Editorial Elsevier Ltd, Octubre, 2016, vol. 218, p. 850-858 [Consultado: 27 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.028>.

TREJO ZAMUDIO, Daniel; GARCÍA TREJO, Juan Fernando & GUTIÉRREZ ANTONIO, Claudia. Conversión de residuos a biocombustibles. En: *Ciencia* [En línea]. México: Editorial de la revista Digital Ciencia, Enero-Marzo, 2019, vol. 70, nro. 1, p. 64-71. [Consultado: 14 de Febrero de 2022]. Disponible en: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/70_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf.

TONDRO, Hadiseh, *et al.* Biological production of hydrogen and acetone-butanol-ethanol from sugarcane bagasse and rice straw using co-culture of *Enterobacter aerogenes* and *Clostridium acetobutylicum*. En: *Biomass and Bioenergy* [En línea]. Irán: Elsevier Ltd, Noviembre, 2020, vol. 142, p. 1-15 [Consultado: 06 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105818>.

URIEN PINEDA, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual [en línea]. Trabajo de Investigación Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química Módulo: Química Analítica. España: Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Analíticas, 2013, p. 18 [Consultado: 21 de Enero de 2022]. Disponible en digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf.

UYTTEBROEK, Maarten; VAN HECKE, Wouter y VANBROEKHOVEN, Karolien. Sustainability metrics of 1-butanol. En: *Catalysis Today* 239 [en línea]. Bélgica: Enero, 2015, p. 7-10 [Consultado: 2 de febrero de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.094>.

VÁSQUEZ RUIZ, Samantha Maite. Obtención de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica presente en la cascarilla del arroz para ser utilizados en equipos motorizados [en línea]. Trabajo experimental Ingeniería ambiental. Cuenca – Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, 2019, p. 2019 [Consultado: 20 de Enero de 2022]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17633/4/UPS-CT008382.pdf>.

VENCES PÉREZ, Suleima, *et al.* Análisis bibliométrico de *Dermochelys coriacea* en México utilizando Vosviewer y Scopus. En: *Nexo Revista Científica* [En línea]. México: Editorial, Junio, 2022, vol. 35, nro. 2, p. 448-458 [Consultado: 20 de Agosto de 2022]. DOI <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14622>.

VEZA, Ibhah; MUHAMAD SAID; Mohd Farid Said y ABDUL LATIFF, Zulkarnain. Recent Advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. En: *Biomass and Bioenergy* [en línea]. Malaysia: Automotive Development Centre, School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Enero, 2021, vol. 144, p. 1-19 [Consultado: 31 de enero de 2022]. DOI <https://doi.org/acceso.unicauca.edu.co/10.1016/j.biombioe.2020.105919>.

WEB OF SCIENCE. [Consultado: 12 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www-webofscience-com.acceso.unicauca.edu.co/wos/woscc/summary/f328e059-be3e-4d4c-b212-707a1c390d30-2d502d03/relevance/1>

ZETTY ARENAS, Ana María, *et al.* Co-fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate and molasses by *Clostridium saccharoperbutylacetonicum*: Effect on sugar consumption and butanol production. En: *Industrial Crops & Products* [En línea]. Brasil: Elsevier B.V., Septiembre, 2021, vol. 167, p. 1-10 [Consultado: 04 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113512>.

ZETTY ARENAS, Ana María, *et al.* Towards enhanced n-butanol production from sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate: Strain screening, and the effects of sugar concentration and butanol tolerance. En: *Biomass and Bioenergy* [En línea]. Brasil: Elsevier B.V., Julio, 2019, vol. 126, p. 190-198 [Consultado: 25 de Mayo de 2022]. DOI <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.011>.