

UNA REVISIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE  
BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA  
LIGNOCELULOSA



ANGIE PATRICIA VELASCO CRISTANCHO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2020

UNA REVISIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE  
BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA  
LIGNOCELULOSA.

ANGIE PATRICIA VELASCO CRISTANCHO

Artículo de reflexión presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Ingeniero Ambiental, Maestrante en gestión y ordenamiento de cuencas

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2020

## UNA REVISIÓN GENERAL DE LOS PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULOSA.

---

*Angie Patricia Velasco Cristancho<sup>1</sup>*

*Jair Esteban Burgos Contento<sup>2</sup>*

### 1. Resumen.

El aumento de la población y la necesidad de satisfacer la demanda de los combustibles fósiles ha provocado que las empresas petroleras generen una explotación indiscriminada, poniendo en riesgo los recursos de las futuras generaciones. Debido a la problemática mencionada anteriormente, se han desarrollado estudios de alternativas energéticas que impactan en menor medida el ambiente, como es la generación de biocombustibles a partir del aprovechamiento de los residuos (Amarís, Manrique, & Jaramillo, 2015). El presente estudio, pretende abordar de manera general la temática relacionada con la producción de bioetanol de segunda, se realizó una revisión bibliográfica dividida en tres etapas, la primera etapa comprende indagar sobre la composición de la biomasa lignocelulósica que se aprovecha para la producción de bioetanol 2G, la segunda etapa pretende la revisión de las tecnologías que se implementan para la producción de bioetanol y finalmente se realiza una contextualización de biocombustibles en Colombia.

**Palabras clave:** hidrólisis, biomasa lignocelulosa, bioetanol, eficiencia

**Abstract:** The increase in population and the need to satisfy the demand for fossil fuels has caused oil companies to generate indiscriminate exploitation, putting the resources of future generations at risk. Due to the problems mentioned above, studies of alternatives have been developed energy that have a lesser impact on the environment, such as the generation of biofuels from the use of waste (Amarís, Manrique, & Jaramillo, 2015). The present study aims to address in a general way the issue related to the production of second-grade bioethanol, a

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Ambiental [angievelasco@usantotomas.edu.co](mailto:angievelasco@usantotomas.edu.co). Universidad Santo Tomás sede Villavicencio.

<sup>2</sup> Coautor. Ingeniero Ambiental, Maestrante en gestión y ordenamiento de cuencas [jairburgos@usantotomas.edu.co](mailto:jairburgos@usantotomas.edu.co). Universidad Santo Tomás.

bibliographic review divided into three stages was carried out, the first stage includes investigating the composition of the lignocellulosic biomass that is used for the production of bioethanol 2G, the second stage aims to review the technologies that are implemented for the production of bioethanol and finally a contextualization of biofuels in Colombia is carried out.

**Keywords:** hydrolysis, lignocellulose biomass, bioethanol, efficiency

## **2. Introducción.**

El crecimiento poblacional ha generado un aumento significativo en los volúmenes de residuos en los rellenos sanitarios, que son ocasionados por la demanda de productos para satisfacer las necesidades básicas y el consumismo de la población. Gran parte de las industrias y comunidades enfrentan problemas para la eliminación de los residuos sólidos (Seguí Gil & Fito Maupoey, 2018), por esta razón, los rellenos sanitarios se saturan de grandes volúmenes de residuo sin ningún tipo de aprovechamiento.

A nivel mundial, los residuos sólidos han ocasionado impactos ambientales negativos por la disposición incorrecta y porque cada día aumenta el volumen de desechos en los vertederos, que van asociados al incremento de la población humana (Malagón Micán et al., 2015), provocando así contaminación como la alteración de las propiedades físico-químicas del agua y del suelo, además generando proliferación de insectos que pueden llegar afectar a la comunidad de una manera directa o indirecta con enfermedades (parasitosis, amebiasis, tenias, fiebre tifoidea, etc.) (Lara, Arcos, Palazulos, & Acosta, 2016)

El hombre ha desarrollado nuevas tecnologías con el fin de satisfacer sus necesidades de transportarte de manera individual, pero no ha tenido en cuenta el gran impacto ambiental que genera la extracción de los residuos fósiles. El aumento de la población y la necesidad de satisfacer la demanda del producto ha provocado que las empresas petroleras generen una explotación indiscriminada, poniendo en riesgo los recursos de las futuras generaciones, es decir, no se desarrollan de manera sostenible. El sistema energético internacional en la actualidad es dependiente de los combustibles fósiles, debido a que el 80% del consumo energético de la población se origina en el aprovechamiento de la energía proveniente del carbón, petróleo y gas,

en el cual se presenta un crecimiento del 3,1% anualmente (Delgado, Salgado, & Perez, 2015) generando altos niveles de concentración de carbón.

El aumento de conciencia ambiental en grupos gubernamentales a nivel mundial y el progreso de innovación en tecnologías en energías renovables han generado el desarrollo de conferencias que impulsan al compromiso de funciones encaminadas al cuidado y protección del medio ambiente (Hernández, 2012). Debido a la problemática mencionada anteriormente, se han desarrollado estudios de alternativas energéticas que impactan en menor medida el ambiente, como es la generación de biocombustibles a partir del aprovechamiento de los residuos (Amarís, Manrique, & Jaramillo, 2015).

Dentro de estos biocombustibles se puede destacar el bioetanol, que es un tipo de alcohol que se obtiene a partir de materias primas azucaradas por medio de la fermentación. En este proceso los azúcares contenidos en la biomasa son metabolizados en alcoholes, principalmente etanol. Este compuesto es usado hoy en día como biocombustible, debido a que cumple el criterio de renovabilidad (al provenir de un residuo agrícola generalmente) y el criterio ambiental (emisión baja de CO<sub>2</sub>) requisitos indispensables para que una energía sea considerada renovable. En el proceso de combustión del etanol las emisiones generadas son menores a la de los combustibles fósiles mitigando el cambio climático (Castro Martínez, Beltrán Arredondo, & Ortiz Ojeda, 2012). Existen diferentes tipos o generaciones de bioetanol:

Bioetanol de primera generación: La principal materia prima es de origen forestal y agrícola, este tipo de biomasa tiene un alto volumen de azúcar y almidones que son fermentados para la producción de etanol (Álvarez, 2010). Los biocombustibles generan un impacto positivo en el ambiente, mediante el cual es mezclado con combustibles fósiles a diferentes porcentajes como E5, E10, E20 y puede ser mezclado hasta E95, los números hacen referencia al porcentaje que se usa de bioetanol para realizar dicha mezcla (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009). Pero este tipo de producción de bioetanol ha tenido polémica debido a que causaron problemas tanto ambientales como a la población, puesto que se requiere destruir bastantes hectáreas de bosque para la plantación de cultivos (Hernández, 2012), de acuerdo con lo anterior, esto

también repercute en el valor de los productos agrícolas aumentando el precio de los cultivos para la producción de bioetanol (Faba, Díaz, & Ordóñez, 2014).

Bioetanol de segunda generación: Es uno de los biocombustibles con mayor capacidad para sustituir a los combustibles convencionales convirtiéndose en una herramienta para combatir el cambio climático (Dias et al., 2012), a diferencia de la anterior generación este no involucra deforestación de bosques para la implementación de cultivos para su producción, esto a su vez puede traer consigo problemas de alimentación para la sociedad (Jambo et al., 2016).

La materia prima es biomasa lignocelulósica, es decir son los residuos vegetales secos provenientes de podas, cascaras de alimentos, desechos agrícolas entre otros, este tipo de biomasa tiene una capa compuesta por celulosa (carbohidrato), este azúcar es fermentado para la producción de bioetanol, al mismo tiempo disminuye el volumen de residuos orgánicos (Hernández, 2012). Hay gran disponibilidad de biomasa lignocelulósica que es descompuesta por microorganismos, que tienen enzimas que son aptas de proporcionar azúcares fermentables para la producción de bioetanol (Castro Martínez et al., 2012).

La problemática ambiental y sobreexplotación del petróleo, además del crecimiento y acumulación de los residuos sólidos sin ningún tipo de aprovechamiento han provocado que se desarrollen investigaciones que puedan suplir ciertas necesidades. La utilización de la biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol de segunda generación (2G) es una alternativa muy prometedora para satisfacer necesidades de la humanidad, puesto que es una fuente que cuenta con alta disponibilidad en gran parte del mundo, proveniente de material no alimenticio como el bagazo de caña de azúcar, despojo de maíz, pasto de trigo, residuos provenientes de las podas, etc (Rebello et al., 2020).

Bioetanol de tercera generación: Esta generación tiene como materia prima el uso de algas marinas que esta conformados por carbohidratos como las anteriores generaciones y alto contenido de lípidos (50%) gracias a esto ayuda a la producción de biodiesel reduciendo impactos negativos al ambiente, pero se le atribuye inconvenientes para su desarrollo puesto que

el costo de producción es muy alto, además de provocar riesgo de contaminación en los estanques (Sharma, Larroche, & Dussap, 2020).

Los avances más importantes para los biocombustibles, se ha desarrollado en Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea. Por ejemplo Polonia, es uno de los países que tiene un gran potencial de cultivo para la producción de biocombustibles, donde su proporción de energía se origina en el desarrollo de fuentes renovables con un porcentaje del 11,8%, lo cual el 10,8% de energía proviene de los biocombustibles(bioetanol) (Mączyńska et al., 2019)

Por otra parte se puede afirmar que los costos de producción para producir bioetanol varían ampliamente entre países (Figura 1) debido a los factores agroclimáticos, la disponibilidad de tierras, insumos, costos de operación, costos de mantenimiento y por último el costo de mano de obra que inciden en el tipo de biomazas empleadas como materia prima, dependerán de las diferentes tecnologías de transformación que se empleen (Carriazo Guevara & Tarras Garcia, 2012).

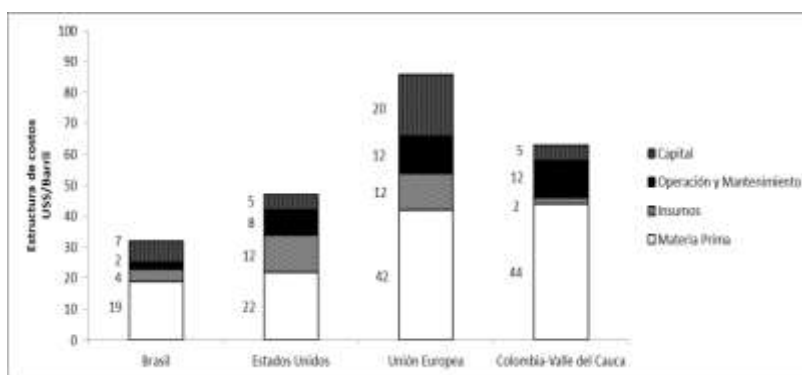


Figura 1: Estructura de costos de producción de bioetanol, adoptado por Carriazo & Tarras (2012)

De acuerdo con los tipos de documentos que permite el acceso a la base de datos Science Direct, durante los doce años se puede evidenciar el crecimiento de los diferentes tipos de documentos asociados al bioetanol de segunda generación (Figura 2), en el año 2016 se incrementó el número publicaciones, en el cual se destacaron los artículos de investigación con 35 publicaciones para ese año.

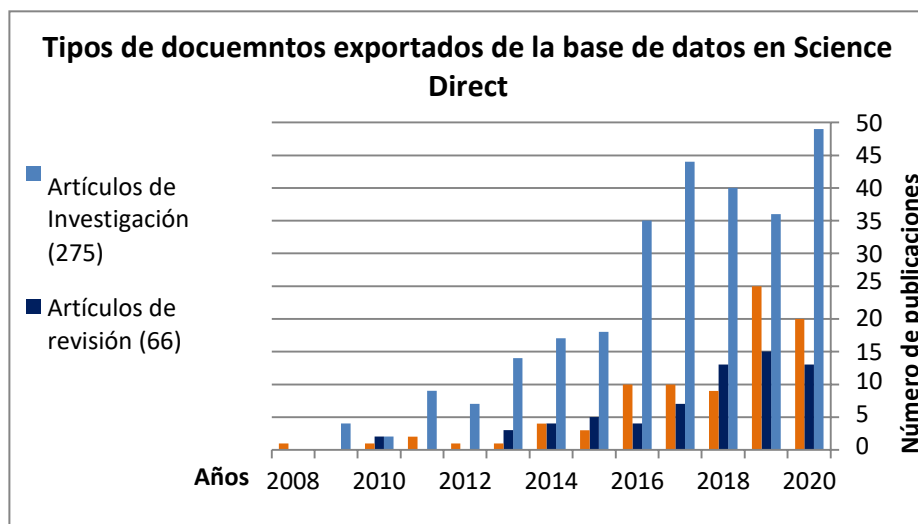


Figura 2: Número de publicaciones de los distintos documentos relacionados con el tema de bioetanol 2G, adoptado de la base de datos de Science Direct, 2020

En Colombia existe diferente normatividad que hacen participe a los biocombustibles como fuente de energía renovable y sostenible, de tal manera que impulsa el uso de biocombustibles o mezclas de gasolina con bioetanol para su utilización, además permite tener mayor rendimiento y ayuda a disminuir las emisiones de gases contaminante (Delgado et al., 2015). Debido a esto en el año 2001 se crea la ley 697, mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía como asunto de interés público, social y de conveniencia nacional, en la cual se asegura el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana y la promoción de fuentes de energías no convencionales, de una manera sostenible para el ambiente.

El presente estudio, pretende abordar de manera general la temática relacionada con la producción de bioetanol de segunda generación y responder la pregunta problemática ¿Qué tipos de tratamientos se utilizan para la producción de bioetanol 2G a partir de biomasa lignocelulosa? Se hace una revisión bibliográfica dividida en tres etapas, la primera etapa comprende indagar sobre la composición de la biomasa lignocelulósica que se aprovecha para la producción de bioetanol 2G, la segunda etapa pretende la revisión de las tecnologías que se implementan para la producción de bioetanol y finalmente se realiza una contextualización de biocombustibles en Colombia.



### 3. Metodología.

Para la elaboración de este artículo se tuvo en cuenta la propuesta planteada por Vera Carrasco (2009) y Guirao Goris (2015) como se observa en la Figura 3, donde se describe la metodología de manera general que se desarrolló en esta investigación. Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en este artículo se determinaron criterios de búsqueda y selección bibliográfica, de tal manera que se usaron fuentes de información secundaria, una vez planteado el tipo de información se procedió a la búsqueda de documentos (artículos de revisión, artículos de investigación, tesis) mediante bases de datos como ScienceDirect, Scopus, ResearchGate, Redalyc, Scielo, las dos primeras bases de datos son recursos electrónicos proporcionados por la Universidad Santo Tomás. Una vez establecidas las bases de datos se determinaron tres criterios de selección: el primero fue el año, donde se tuvo en cuenta documentos publicados en los años 2020 al 2009, puesto que los documentos publicados en el rango de tiempo menor establecido cuentan con mayor profundización del tema, como segundo criterio, se determinó que todos los artículos debían estar relacionados con bioetanol de segunda generación (2G), biomasa lignocelulosa, tratamientos de fermentación de bioetanol 2G y contextualización de los biocombustibles en Colombia, en el tercer criterio se seleccionaron tesis de maestría y doctorados, cabe añadir que no se tuvo en cuenta el índice de impacto en la revistas, por último, se organizó la información recolectada con el fin de generar al lector una síntesis del tema, este documento es totalmente descriptivo.

1. Tipos de fuentes de información	2. Búsqueda de documentos	3. Criterios de selección	4. Evaluación y análisis de los documentos seleccionados
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuentes primarias</li> <li>• Fuentes secundarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ScienceDirect</li> <li>• Bases de datos</li> <li>• Scopus</li> <li>• ResearchGate</li> <li>• Redalyc</li> <li>• Scielo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• año</li> <li>• información relacionada al tema de trabajo</li> <li>• Tipos de tesis</li> <li>• Índices de impacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• organización, combinación y argumentación de los documentos.</li> </ul>

Figura 3: Metodología general, adaptado de Vera Carrasco (2009) y Guirao Goris (2015).

## 4. Desarrollo y discusión.

### 4.1 Composición de la biomasa lignocelulósica.

Para el desarrollo del primer objetivo planteado se describe la composición de la biomasa lignocelulosa que se aprovecha para generar biocombustibles de segunda generación. La lignocelulosa es el elemento esencial de la pared celular en la materia vegetal (árboles, arbustos y pastos) es creada por el procesos fotosintético que abarca el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  adicionalmente aprovecha de los rayos ultravioleta procedente del sol como fuente de energía, como producto de este proceso se genera la savia que está constituida por agua, azúcar y minerales (Chávez-Sifontes, 2019). Este tipo de biomasa se usa para generar productos químicos, biocombustibles y elementos bioquímicos (Garver & Liu, 2014), puesto que es una fuente renovable que proporciona alternativas sostenibles a corto y largo plazo (Gómez et al., 2012).

La materia lignocelulósica se constituye principalmente de tres moléculas vegetales (Figura 4): con 30% -35% de celulosa en peso, es un polímero que consiste en unidades de glucosa; hemicelulosa del 25%-30% en peso de la biomasa constituida por azucares de pentosa y hexosa; lignina del 10%-20% en peso que está constituido por moléculas vegetales que no son solubles en agua provocando impermeablización y resistencia a cualquier ataque (biológico y físico) (Achinas & Euverink, 2016), de acuerdo con Chávez-Sifontes (2019) mencionan que la celulosa conforma 38-50%, la hemicelulosa 23-32% y la lignina 15-25% (

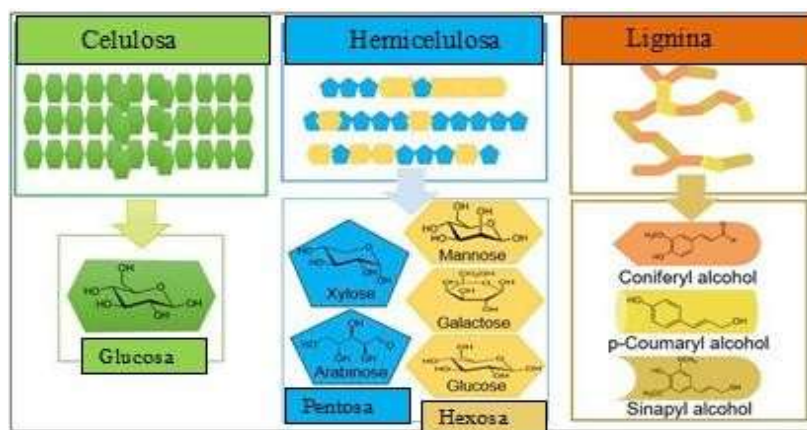


Figura 5), las diferencias de la composición de los porcentajes en la biomasa lignocelulósica depende del tipo de material vegetal, los dos primeros componentes conforman el 70%

aproximadamente de la biomasa y se enlaza con la lignina ocasionando fuerza y solidez a las plantas.

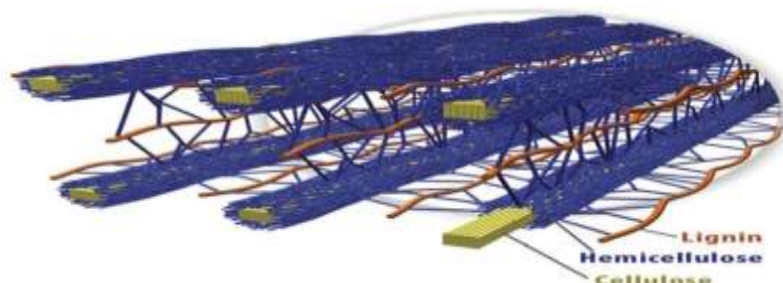


Figura 4 Muestra espacial de los tres biopolímeros que conforman la biomasa lignocelulósica, adoptado de Brandt et al. (2013).

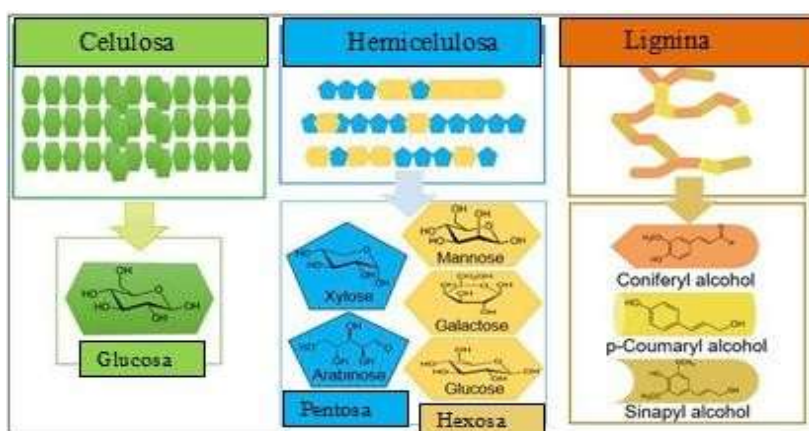


Figura 5: Composición de las moléculas vegetales que conforman la biomasa lignocelulosa, adaptado de Houfani et al., (2020)

Algunas materias primas sostenibles para la producción de bioetanol son los residuos provenientes de la agricultura, en América del norte el uso del suelo principal son los cultivos forestales abarcan el 35% (Miao et al., 2013) en los procesos de producción y fabricación de un producto a partir de cultivos estos provocan residuos que son fuente de biomasa lignocelulosa para la generación de bioetanol, otra fuente son los residuos municipales e industriales alimenticios que son materia prima para el aprovechamiento para la obtención de etanol (Grotewold et al., 2015).

## 4.2 Tratamientos para la biomasa lignocelulósica

Existen dos perspectivas para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos ya sea por procesos de conversión bioquímica o por conversión termoquímica, con el fin de degradar el material mediante el cual se hidroliza los polisacáridos convirtiéndolos en azúcar que son fermentados con el objetivo de obtener bioetanol de segunda generación (Mu et al., 2010).

Los procedimientos que modifican el material lignocelulósico se catalogan en dos partes: procedimientos primarios, en estos procedimientos se altera la biomasa logrando alcanzar sustancias intermedias de interés ya sea por irradiación, agua caliente, fragmentación mecánica; por otro lado los procesos secundarios son el mejoramiento de esas sustancias intermedias para convertirlas en productos finales (Chávez-Sifontes, 2019)

### 4.2.1 Conversión termoquímica

El proceso de conversión termoquímica comprende la degradación térmica de los compuestos orgánicos que está en la biomasa para producir biocombustibles, es decir, a lo largo del proceso la biomasa es calentada con oxígeno (aire) o vapor de agua para generar gas sintético o una mezcla líquida (Jambo et al., 2016) Existen rutas para el procesamiento de conversión termoquímica (Figura 6) como: licuefacción y pirólisis, gasificación o combustión directa como se observa en la figura tal (Rodríguez et al., 2011).

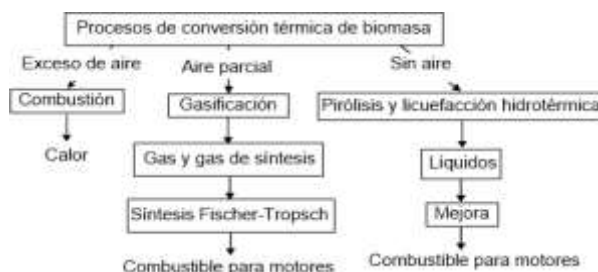


Figura 6: Procesos de conversión termoquímica de la biomasa, adaptado de Rodríguez et al.,(2011).

#### 4.2.1.1 Gasificación:

Es un tratamiento térmico mediante el cual se convierten los materiales sólidos orgánicos e inorgánicos de la biomasa seca en un gas combustible. Este proceso de conversión termoquímica para la producción de bioetanol requiere de dos pasos principales: gasificación y síntesis del material orgánico con el fin de generar un gas de bajo o medio poder calórico (Mu et al., 2010).

Durante este proceso ocurren varias etapas (Figura 7) con la finalidad de descomponer el material en gas de síntesis conformado esencialmente hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Nikodinovic-Runic et al., 2013) primeramente la biomasa pasa por una etapa de secado de tal manera que el agua contenida sea evaporada a una temperatura mayor de los  $100^{\circ}C$ , en la segunda etapa la biomasa sufre rotura de moléculas grandes por calor ( $200$  y  $600^{\circ}C$ ) en ausencia de oxígeno (pirólisis) en esta etapa se genera residuo carbonoso, gases condensables (hidrocarburos), metano, vapor de agua, monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2009), seguidamente pasa por un proceso de oxidación, mediante el cual se eleva la temperatura ( $700-2000^{\circ}C$ ) en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua) y por último, en esta etapa ocurre un proceso de reducción lo cual se produce hidrógeno molecular (6-65%), monóxido de carbono (8-53%) y metano (2-26%) (Malmgren & Riley, 2018).

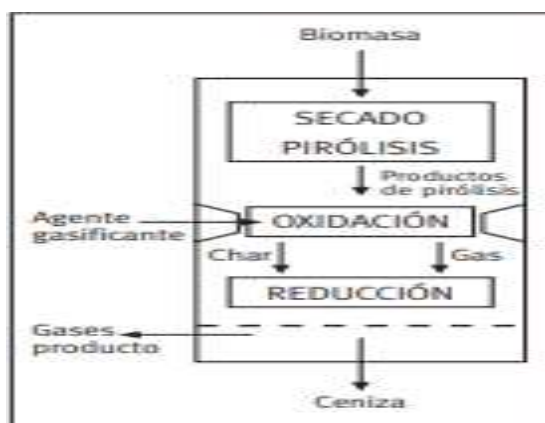


Figura 7: Etapas del proceso de gasificación, adoptado de (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2009).

Una vez obtenido el gas de síntesis para la obtención de biocombustibles se pueden realizar

por dos métodos; en primer lugar el método de catálisis química del gas de síntesis consiste en llevar al reactor de lecho fijo de sulfuro de molibdeno el gas de síntesis con el fin de condensar los diferentes alcoholes, después de realizar este proceso los alcoholes son condensados y separados del gas restante (Zhang et al., 2019), por otra parte el método de fermentación de gas de síntesis consiste en enviar este gas un equipo de fermentación mediante acetógenos\* (*Clostridium ljungdahlii*, *Clostridium autoethanogenum* *Eubacterium limosum*) que utiliza el carbono como fuente de energía para la producción de biocombustibles. (Liu et al., 2014).

#### **4.2.1.2 Pirolisis:**

Es un proceso termoquímico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno a temperaturas 200-750°C, cuenta con tres etapas para su desarrollo, la primera comprende absorción de calor (25-180°C) por parte de la biomasa provocando la liberación de la humedad mediante vapor de agua, para dar rompimiento a la hemicelulosa, celulosa y lignina de la biomasa se realiza a temperaturas 180-370°C, de tal manera que a los 370°C se genera la ruptura de los polisacáridos provocando la formación de ácido acético, metanol y acetona y por último, en esta etapa se produce la degradación total de la lignina a temperaturas mayores a los 370°C, como producto final de este proceso es obtiene bioaceite (Rodriguez et al., 2011), que debe pasar por un proceso de hidrodesoxigenación (Figura 8), que consiste en la eliminación de la impurezas y del oxígeno en forma de agua, a elevadas presiones (100-200 bar) de hidrógeno y altas temperatura (300-450°C) por medio de catalizadores (Co-Mo, Pt, Ni) generando como producto final hidrocarburos líquidos (Chan & Martínez, 2018) (Serrano-Ruiz & Luque, 2011).

---

\* Acetógeno: Microorganismo capaz de generar acetato en condiciones de ausencia total de oxígeno atmosférico para la producción de etanol (Corrales et al., 2015).

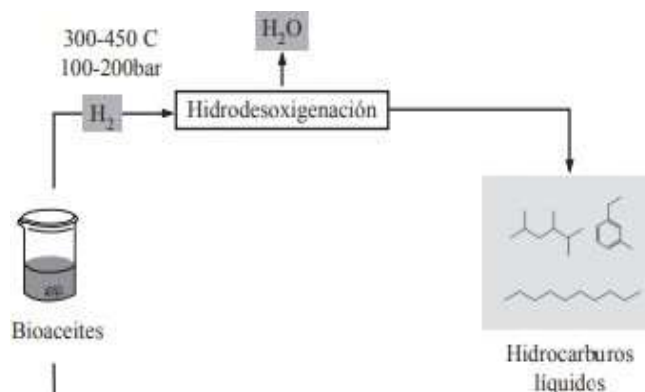


Figura 8: Ruta para la conversión de los bioaceites en hidrocarburos líquidos, adoptado de Serrano-Ruiz & Luque, (2011)

#### 4.2.1.3 Licuefacción hidrotermal:

Este proceso consiste en la degradación de las moléculas de mayor tamaño en combustibles líquidos, mediante el uso de agua caliente para activar la reacción, no requiere de adicionar solvente por su alto contenido de humedad (Flórez Ramos, 2016), este proceso se realiza a temperaturas más bajas (200- 500°C) y altas presiones (5-20 bar), para este proceso no indispensable secar la biomasa con anticipación, dado que la biomasa con alta humedad tiene un beneficio en el ahorro de energía para el desarrollo del tratamiento, como producto final se obtiene bioaceite empleados en turbinas de cogeneración y generadores diésel (Chen et al., 2019).

#### 4.2.1. El proceso de conversión bioquímica

A diferencia del anterior incorpora cuatro procedimientos para la obtención de bioetanol (Figura 9), el primer proceso es realizar un pre-tratamiento a la biomasa lignocelulósica con el fin de reducir la composición de la celulosa y hemicelulosa, seguidamente se hidroliza y el material resultante de este proceso se lleva a un proceso de fermentación y por último la sustancia proveniente del proceso anterior es destilada (Achinas & Euverink, 2016) (Spatari, Bagley, & MacLean, 2010)



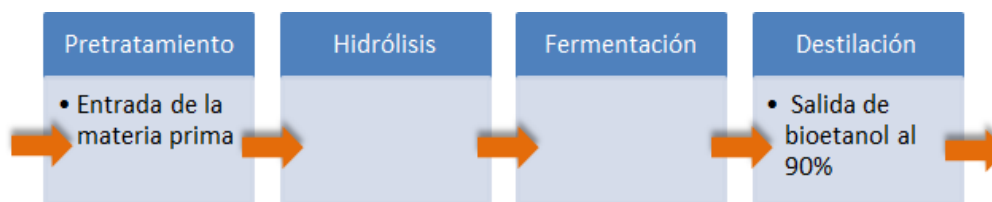


Figura 9: Proceso de conversión bioquímica para la producción de bioetanol, adaptado de Achinas & Euverink ( 2016)

#### 4.2.1.1. Pre-tratamiento.

La biomasa lignocelulósica es una materia que por su estructura es difícil de hidrolizar debido a la composición cristalina amorfa que tiene las microfibras de la celulosa por consiguiente están recubiertas por una capa de hemicelulosa y lignina que actúa como barrera resistente frente a reactivos químicos, por eso es muy importante la implementación de un pre-tratamiento para que este tipo de biomasa sea fraccionada (Hendriks & Zeeman, 2009) para su posterior fermentación.

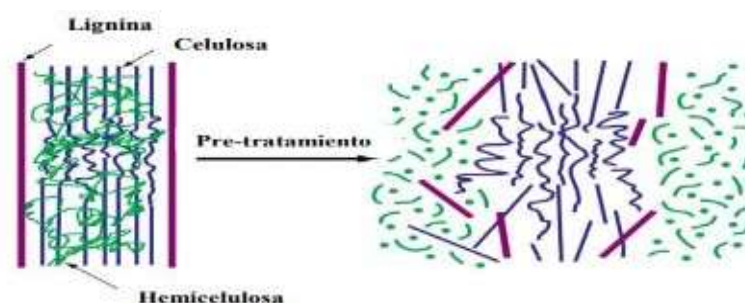


Figura 10: Consecuencia del pre-tratamiento en la biomasa lignocelulosa, adoptado de Vergara Alarcón (2019).

De acuerdo a Zhu & Pan ( 2010) existen diferentes tipos de pre-tratamientos para cada material lignocelulósico, estos pueden ser usados de manera individual o en conjunto y se catalogan en tres grupos (físicos, químicos, biológicos) (Behera et al., 2014), cabe resaltar que aún no se ha desarrollado un pre-tratamiento general que le funcione a cualquier tipo de biomasa (Zheng et al., 2017).



Tabla 1: Síntesis de los tipos de los pre-tratamientos para la biomasa

Tipos de Pre-tratamientos para la descomposición de la biomasa	
Pre-tratamientos físicos	
<b>Mecánico</b>	El material es atravesado por un proceso (Cuervo, Folch, & Quiroz, 2009) de fragmentación, triturado y molienda (Cortes Ortiz, 2014) provocando el corte de la biomasa en pequeños pedazos
Pre-tratamientos químicos	
<b>Ácido</b>	Consiste en la adición de ácidos (López González et al., 2018) diluidos o concentrados para degradación del material
<b>Alcalino</b>	Se basa en la adición de bases (Viñales Verde et al., 2012) diluidas para la descomposición de la biomasa
<b>Explosión por vapor</b>	La biomasa lignocelulósica es controlada (Piñeros-castro, Velasco, Proaños, a altas temperaturas por medio de la & Cortes, 2011) introducción directa de vapor durante un periodo de tiempo
Pre-tratamiento biológico	
<b>Microorganismos de podredumbre</b>	Se basa en la degradación del material (López González et al., 2018) por medio de microorganismos especializados para la descomposición de la lignina

Nota: En esta tabla se muestran los diferentes tipos de pre-tratamientos para la biomasa lignocelulósica.

#### 4.2.1.2. Pre-tratamientos físicos:

Estos pre-tratamientos tienen el objetivo de dividir y deshacer la cristalinidad de la celulosa separándola de la hemicelulosa y lignina para un mayor aprovechamiento del material (Figura 11), se han llevado a cabo diferentes tipos de tratamiento físicos, especialmente la utilización de fresado, irradiación, explosión de vapor y tratamientos químicos, sin embargo, algunos de estos tratamientos no son muy favorables sin el uso de reactivos químicos (Torun, 2017).



Figura 11: Degradación de la cristalinidad de la celulosa y ruptura de la lignina y hemicelulosa, adoptado por Torun (2017).

#### *Fragmentación mecánica:*

Este tipo de pre-tratamiento es el más común para aumentar el tamaño de los poros con el fin de minimizar la cristalinidad y la cantidad de unidades recurrentes de polímeros que se encuentran en la biomasa lignocelulosa (Vergara Alarcón, 2019) pasando por un proceso de fragmentación, triturado y molienda (hasta 0,2- 22mm) (Cuervo et al., 2009), a su vez aumenta la magnitud del área superficial dejándola más tratable para el siguiente proceso. En este pre-tratamiento existen varios equipos para llevar a cabo este procedimiento, de acuerdo a la investigación realizada por Zheng et al., (2017) mencionan que el molino de bola y el fresado son los equipos más eficaces para la disminución de la magnitud de la partícula y son capaces de alterar la estructura de la biomasa, como se mencionó anteriormente no se ha desarrollado un pre-tratamiento general, la elección de este estará basada en la composición de la materia lignocelulosa, en el artículo desarrollado por Kratky & Jirout (2011) mencionan que es importante tener en cuenta el porcentaje de humedad que comprende el material, si el porcentaje de humedad de la biomasa es menor al 15% se determina que es una biomasa seca, es decir, que el equipo más eficiente para la descomposición de la materia es el fresado con martillo, en cambio si el porcentaje de humedad es mayor al 15% el equipo es un molino coloidal, como se mencionó anteriormente el molino de bolas sirve para los dos porcentajes de humedad descritos.

### ***Irradiación:***

este tratamiento se basa en alterar la composición estructural de los materiales poliméricos por medio de rayos gamma, microondas y haz de electrones provocando reacciones químicas como consecuencia el deterioro de los polisacáridos a partir de la división de enlaces glucosídicos (monómeros de glucosa), es decir, interrupción y reducción la estructura ideal para la descomposición (Zheng et al., 2017) (Serrato Sabogal, 2018) Para obtener mayor rendimiento en este proceso Torun (2017) en su investigación menciona que incorporar procesos químicos y físicos en este tratamiento aceleran el proceso de degradación a mínimas concentraciones de irradiación provocando que el proceso sea más fácil y con mejores resultados.

#### **4.2.1.3. Pre-tratamiento químico:**

Este tratamiento permite la fragmentación de los biopolímeros de la biomasa lignocelulósica por medio de reactivos químicos a presión y temperatura ambiente, minimizando el porcentaje de la cristalinidad de la celulosa y aumentando el área superficial (Behera et al., 2014). Behera (2014) en su artículo cita algunos productos químicos para el desarrollo de este proceso como son los agentes oxidantes, alcalinos y algunas sales (hidróxido de cloro y ácido sulfúrico).

### ***Pre-tratamiento ácido:***

Este tratamiento permite de manera sencilla la descomposición de la biomasa lignocelulósica, ocasionando que la estructura del material esté listo para el proceso hidrolisis; pero se somete a ciertas condiciones como el tipo de reactivo, el porcentaje de concentración, relación sólido-líquido y por ultimo temperatura. Existe gran variedad de ácidos para la desarrollo de este método ácidos inorgánicos (ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ), ácido clorhídrico ( $HCl$ )), ácidos orgánicos (ácido peracético, el ácido maleico) (Behera et al., 2014).

### ***Pre-tratamiento alcalino:***

Es uno de los métodos más estudiados, entre ellos se encuentran algunas sales como hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y peróxido de hidrogeno, consiste en suprimir el grupo acetil que se encuentra en la hemicelulosa permitiendo un mayor accesibilidad a la celulosa, este

proceso consiste en la inflamación en la estructura por esta razón disminuye el porcentaje de cristalinidad, además se genera un incremento en la superficie del material, provocando fraccionamiento de la estructura de la lignina(Behera et al., 2014).

#### **4.2.1.4. Pre-tratamiento biológico:**

Este método utiliza microorganismos para la descomposición específica de la biomasa lignocelulosa en condiciones moderadas, no requiere de alto consumo energético ni de reactivos químicos, sin embargo, este método requiere una alta demanda de tiempo para su degradación (Fatma et al., 2018). Uno de los tratamientos biológicos que ha llamado la atención es el proceso mixto en medio microbiano y hongos formando enzimas complejas capaces de descomponer la lignina; en este campo los hongos de podredumbre blanda y blanca por sus enzimas degradantes tienen una alta capacidad para descomponer la lignina y la hemicelulosa (Sindhu, Binod, & Pandey, 2016). Para la implementación de este tipo de tratamiento existen parámetros que se tienen que tener en cuenta como la composición de la biomasa, rango de incubación, pH, el grado de temperatura, el tiempo, la el porcentaje de concentración y el tipo de microorganismo a usar, porcentaje de humedad, entre otros parámetros, todo eso con el fin de tener mejores resultados (Sindhu et al., 2016).

Es esencial la implementación de un pre-tratamiento eficaz para que este tipo de biomasa sea fraccionada (Hendriks & Zeeman, 2009) y sea más fácil obtener azúcares fermentables para la producción de bioetanol, sin embargo, no existe un pre-tratamiento universal que funcione con todos los tipo de material lignocelulósico existente, la elección del pre-tratamiento depende de diferentes factores, la composición de la biomasa, consecuencias, probabilidad económica y ambiental, puesto que algunos tratamientos provocan la elaboración de compuestos inhibidores (Behera et al., 2014).

#### **4.2.1.5. Hidrolisis:**

En este proceso se realiza la descomposición y ruptura de las moléculas de la celulosa y la hemicelulosa siendo compuestos complejos convirtiéndolos en glucosa (azúcares reductores) (Figura 12) para su posterior producción de bioetanol.(Rebello et al., 2020) (Faba et al., 2014).

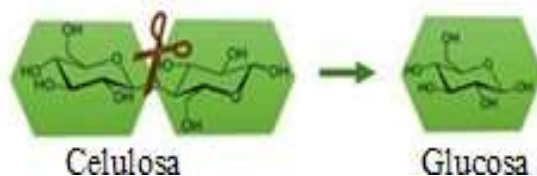


Figura 12: Resultado del proceso de hidrólisis en la celulosa, adoptado de Houfani et al., (2020).

Existen dos técnicas para hidrolizar la materia: 1) Hidrólisis por reacción ácida ya sea diluida que consta en la modificación de los cristales que se encuentran en la celulosa por medio de temperaturas elevadas (200-240°C), esta técnica no es muy usada por el alto porcentaje de inhibidores, por otra lado está la reacción ácida concentrada, esta técnica es más efectiva que la mencionada anteriormente, generando un aumento aproximado del 80% en los azúcares libres, aunque esta técnica sea muy eficiente requiere de grandes dosis de ácido para su ejecución (Achinas & Euverink, 2016), a su vez provocando la presencia de nuevos compuestos (aldehídos), esto ha causado problemas para los investigadores, por lo que se enfocan en la segunda técnica (Sharma et al., 2020) 2) Hidrólisis enzimática: consiste en elegir un productor microbiano dependiendo de cada necesidad, por medio de enzimas celulasas (hongos) en condiciones de temperatura entre el 50-60°C y pH 4.8 a 5.0 (Vergara Alarcón, 2019), sin la creación de inhibidores, en el artículo de Achinas & Euverink (2016) cita a dos investigadores mediante el cual afirman que *Trichoderma reesei* es un hongo que proporciona grandes resultados y más si se combina con reactivos químicos como el hidróxido de magnesio y óxido de calcio generando un mejor rendimiento en esta técnica (Achinas & Euverink, 2016).

#### 4.2.1.6. Fermentación:

Es muy importante que la biomasa lignocelulósica haya pasado por todos los procesos anteriormente mencionados puesto que son esenciales para llegar al producto que se requiere. La fermentación es un proceso biológico que requiere microorganismos para su ejecución, principalmente de levaduras y bacterias, los cuales tienen la capacidad de transformar los azúcares en etanol o en otros productos como son los ácidos o gases (Sánchez et al., 2010). Existen diferentes técnicas de fermentación por ejemplo hidrólisis y fermentación separadas

(SHF<sup>\*</sup>), en esta técnica la biomasa pre-tratada pasa a un reactor para ser hidrolizado por el cual tiene como objetivo la descomposición de azúcares, una vez terminado este proceso la materia prima es trasladada a otra unidad para su posterior fermentación para la producción de bioetanol, pero esta técnica cuenta con varias desventajas debido a que se requiere gran cantidad de carga de enzimas para su ejecución (Sharma et al., 2020), una de las técnicas más eficiente es la sacarificación y fermentación simultáneas (SSF<sup>\*\*</sup>), es decir, que estos dos procesos ocurren en una sola unidad con una temperatura de 50°C, provocando una minimización en los costos de producción y evitando los compuestos inhibidores puesto que los microorganismos que se emplean consume este tipo de compuesto, es una excelente opción para la industria prometiendo un alto rendimiento de etanol (Achinas & Euverink, 2016).

#### **4.2.1.7. Destilación:**

Es el último proceso que se le realiza al material con el fin de generar bioetanol, en este proceso se realiza la separación de la mezcla resultante de los anteriores procesos, la mezcla líquida está conformada por agua y bioetanol. En este proceso existen tres técnicas para realizar la división de las sustancias: la extracción líquido-líquido pues consiste en mantener el etanol en un estado orgánico para aumentar la concentración, la segunda técnica es destilación azeotrópica y por último destilación extractiva.

La destilación azeotrópica es la separación de dos sustancias que tienen volatilidades muy próximas, es por esto que requiere el uso de una tercera también llamado agente de separación la cual provoca una mezcla azeotrópica entre una de las sustancias principales, ocasionando la presencia de dos fases en la mezcla, gracias a esto genera la inmiscibilidad aumentando las diferencias de los puntos de ebullición (Speight, 2011).

En el caso de la destilación agua-bioetanol generalmente se le adiciona benceno para provocar diferencias de temperaturas en el punto de ebullición, como se ve en la Figura 13, la mezcla de etanol y agua entra a la columna de destilación con el agente separador alterando el

---

<sup>\*</sup> Hidrólisis y fermentación separadas por sus siglas en inglés Separated Hydrolysis and Fermentation (SHF)

<sup>\*\*</sup> Sacarificación y fermentación simultáneas por sus siglas en inglés Multaneous Saccharification and Fermentation (SSF)

punto de ebullición, Lauzurique-Guerra et al., (2017) en su investigación afirma que el nuevo punto de ebullición de la mezcla (agua y benceno) es de  $64,9^{\circ}\text{C}$ , lo cual proporciona como producto final la separación del etanol con un punto de ebullición del  $78,4^{\circ}\text{C}$ , este proceso cuenta con dos columnas más con el fin de separar el agua y el benceno para sea aprovechado nuevamente en el proceso

Existen diferentes tipos de agentes separador el más conocido es el benceno para realizar el proceso de destilación agua-etanol, sin embargo se descubrió que es un compuesto cancerígeno por lo cual su uso ha disminuido, en reemplazo de este se encuentra el tolueno (Qi et al., 2020).

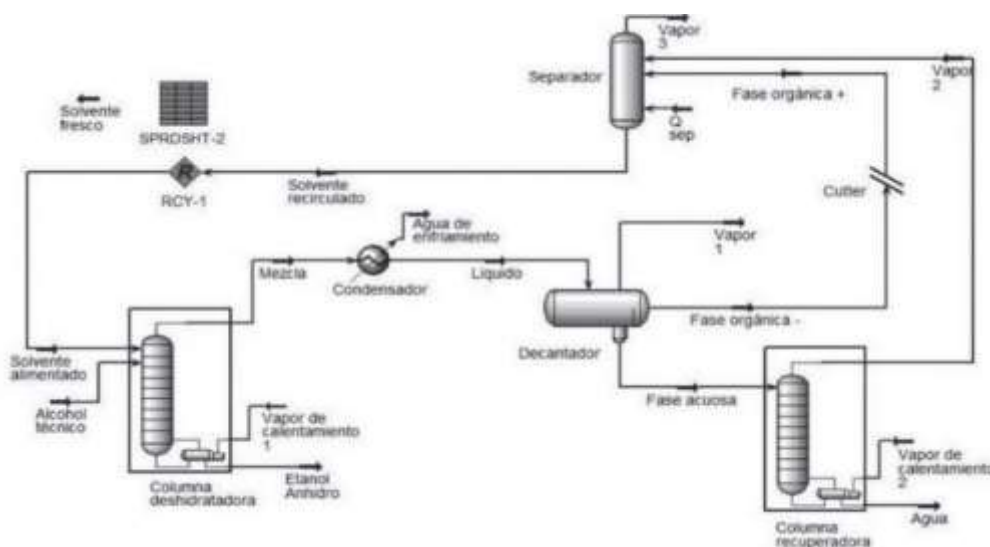


Figura 13: Proceso de destilación azeotrópica, adoptado de Lauzurique-Guerra et al., (2017)

El proceso más usado a escala industrial es destilación extractiva debido a que no requiere de mucho consumo energético, esta técnica se fundamenta en el uso de un disolvente que es capaz de separar las sustancias de la mezcla teniendo en cuenta la solubilidad del disolvente y los diferentes puntos de ebullición, modificando la volatilidad del producto principal sin la creación de otra sustancia que puedan intervenir en el proceso (Figura 14). Actualmente la sal más utilizada para la ejecución de la destilación extractiva es el cloruro de calcio como agente de separación puesto que sus costos de inversión son menores a otras sales (Sharma et al., 2020), sin embargo, de acuerdo con el caso de estudio realizado por Lauzurique Guerra et al.,(2017) concluyeron que desde el punto de vista energético la sal que resulta más conveniente para este tipo de destilación es NaCl la implementación de sales en este proceso permite obtener una

mejor división de tal manera que ayuda a disminuir el consumo energético de los elementos sin embargo existen diferentes tipos de sales

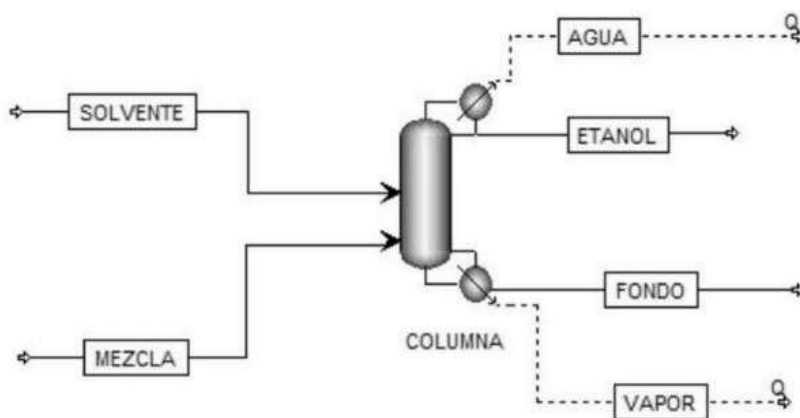


Figura 14: Esquema de la técnica de destilación extractiva, adoptado por Lauzurique Guerra et al., (2017)

Para el cumplimiento del tercer objetivo planteado en este artículo de revisión, es importante tener en cuenta que los últimos años ha aumentado la demanda de los combustibles provenientes de los hidrocarburos y productos relacionados con el petróleo, a consecuencia de esto se ha visto afectado por la disminución de las reservas actuales de este recurso natural no renovable y provocando alteraciones en los ecosistemas (Jimoh & Lin, 2019), por ello se han creado diferentes alternativas o tecnologías verdes con el fin de satisfacer dicha demanda que sean más amigables con el medio ambiente (Valero, Valero, Calvo, & Ortego, 2018).

De acuerdo al artículo de Morelos (2016) para el año 2030 se aumentará el 55% de la demanda de combustibles de procedencia biológica de acuerdo a las cifras presentadas en el año 2004, los países que incrementarán la elaboración de biocombustibles y son líderes en la producción de bioetanol son Estados Unidos con 33,2%, Brasil con 21,8, 20,6 en la Unión Europea, Argentina con 4,1% y Colombia con el 0,8%.

### **4.3 Contextualización del bioetanol en Colombia**

En Colombia en el año 2001 se crea la Ley 697, mediante la cual se fomenta el uso de energías alternativas como asunto de interés público, social y de conveniencia nacional, en la



cual se asegura el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana y la promoción de fuentes de energías no convencionales, de una manera sostenible para el ambiente (Carriazo Guevara & Tarras Garcia, 2012), además en el año 2004 se crea la Ley 939 por medio de ella se dicta el uso de combustibles de procedencia animal y vegetal para el uso en carros, para el año 2005 la normatividad colombiana dictó generar producción más limpia, de modo que promueven la producción de etanol como alternativa de mezclado con gasolina y diésel generando reducción de emisiones contaminantes y un alto rendimiento, además en el año 2007 se crea el Decreto 2629 del Ministerio de Minas y Energía, en este se promueve la utilización de biocombustibles en Colombia de acuerdo al cronograma estipula que a partir del año 2012 todos los vehículos nuevos tendrán que contar con motor flex-fuel, es decir, que a partir de 2012 todos los automóviles contaran con un motor capaz de funcionar con gasolina y mezclas de gasolina con etanol al 20% (Delgado et al., 2015).

De acuerdo con lo anterior Colombia ha tenido un progreso fundamental en la creación de normatividad que fomenta la utilización de los biocombustibles para mezcla en gasolina como para diesel generando desarrollo de la industria en el país. Actualmente en Colombia existen siete ingenios productores de bioetanol provenientes del tratamiento de los cultivos de caña de azúcar según los datos obtenidos de la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia (Figura 15), una ubicada en Risaralda, cuatro de ellas ubicadas en el departamento del Valle del Cauca, una en el Cauca y otro en el Meta (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2019).

La producción de bioetanol que se genera en Colombia es de procedencia de cultivos de caña de azúcar como materia prima, sin embargo, como proceso principal es la producción de azúcar y como segundo proceso es la producción de bioetanol a partir de bagazo de la caña La mayoría de la producción que se genera en Colombia es de procedencia de cultivos alimenticios, poniendo en riesgo la demanda alimenticia y aumentando el valor de los productos del mercado procedentes de cultivos(Sector agroindustrial de la caña, 2017).

DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE MEZCLA DE ALCOHOL CARBURANTE (ETANOL) EN EL TERRITORIO NACIONAL

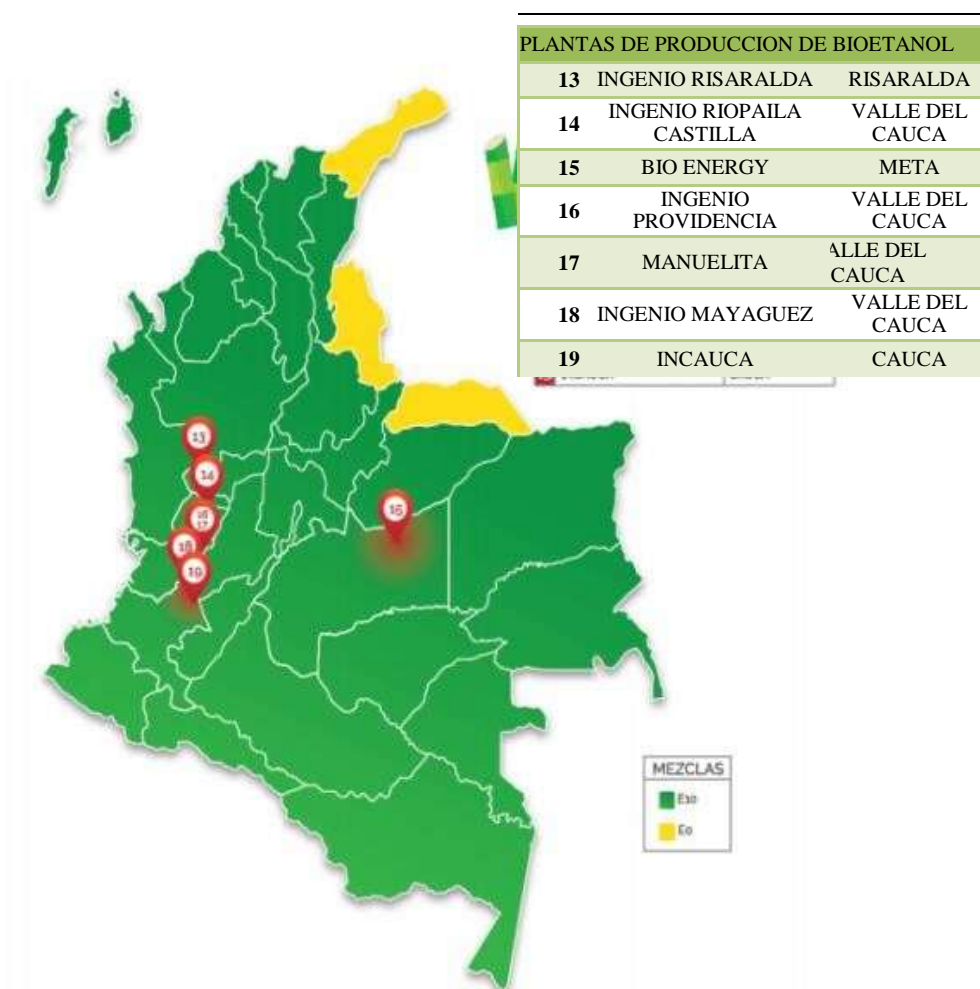


Figura 15: Distribución de las plantas de producción de bioetanol en el territorio nacional, adoptado de Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, (2019).

Con respecto a su proceso (Figura 17) y capacidad de producción Colombia genera 2,1 millones de litros de bioetanol al día. El valor de producción ha tenido un ascenso gradual durante los últimos años de acuerdo con Colmenares et al.,(2020) pues en su investigación afirman que para el año 2019 Colombia producía aproximadamente 1,1 millones de litros al día, como se mencionó anteriormente en la Figura 16 se observa el cambio de producción de etanol.

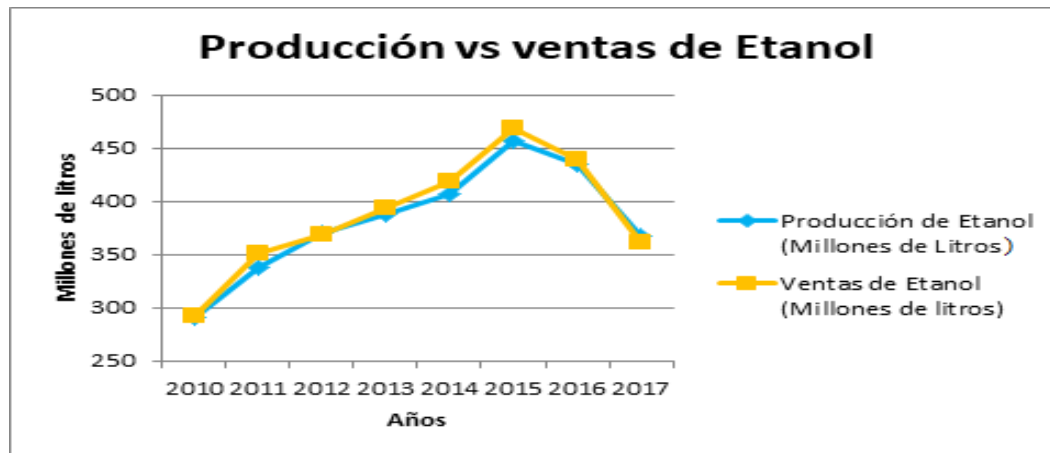


Figura 16: Producción Vs Ventas de bioetanol durante los últimos años en Colombia. Adaptado de Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia,(2019).

Según la Resolución 18-0687 del 2003 en el título II se establece el programa de oxigenación de los combustibles como estrategia para el cumplimiento del compromiso (reducir el 20% de las emisiones GEI para el año 2030) asumido por Colombia en la Conferencia de Paris sobre el cambio climático 2015 (COP21). De acuerdo con el informe de sostenibilidad 2019-2020 elaborado por Asocaña mencionan los resultados generados por el análisis del ciclo de vida del etanol realizado por la EMPA\* y CNMPL\*\*, en el cual afirman: el etanol fabricado en Colombia disminuye en un 74% las emisiones de gases efecto invernadero.



Figura 17: Proceso de producción del bioetanol en Colombia, adoptado de (Calero et al., 2020).

\* The Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA)

\*\* Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales de Medellín (CNMPL)

## **5. Conclusiones**

La biomasa lignocelulosa es una fuente de energía renovable para la producción de bioetanol de segunda generación, existen dos vías de producción: el proceso bioquímico cuenta con cinco etapas, se inicia con el pre-tratamiento de la materia, se procede a hidrolizar y fermentar los azúcares y como etapa final es la destilación del producto; el proceso termoquímico también cuenta con cinco etapas, en primer lugar está el secado de la materia, pirólisis, oxidación, reducción y por último método para la obtención de etanol por medio del gas de síntesis.

De acuerdo con lo anterior, estos dos métodos para la producción de bioetanol se ponen a consideración del lector y la comunidad educativa investigar para el desarrollo y el mejoramiento en la eficiencia de tecnologías para la reducción de costos, puesto que en el proceso bioquímico actualmente no se han impulsado tecnologías que sean capaces de procesar la biomasa lignocelulosa de manera eficiente para tener un mejor rendimiento y esto a su vez el costo de inversión es muy elevado en cada uno de los procesos para la producción de bioetanol, por otro lado el proceso termoquímico se debe trabajar para mejorar la eficiencia de los catalizadores, debido a que trabajan en condiciones muy extremas y producciones bajas.

Este compuesto es usado hoy en día como biocombustible, debido a que cumple el criterio de renovabilidad (al provenir de un residuo agrícola, podas, etc.) y el criterio ambiental (emisión baja de CO<sub>2</sub>) requisitos indispensables para que una energía sea considerada renovable y que sin lugar a dudas es un mecanismo que ayuda la transición energética para una alternativa más amigable con el ambiente sin poner en riesgo los productos alimenticios.

Sin embargo, el procesamiento de esta materia prima enfrenta varias dificultades para su producción, es decir, actualmente no se han impulsado tecnologías que sean capaces de procesar la biomasa lignocelulosa de manera eficiente para tener un mejor rendimiento y esto a su vez el costo de inversión es muy elevado en cada uno de los procesos para la producción de bioetanol, por esta razón es importante el desarrollo de nuevas investigaciones y pruebas piloto para tener una mejor eficiencia en los procesos, de manera que ocasionaría disminución en los costos de producción.

Actualmente en Colombia se produce bioetanol de segunda generación a escala industrial, las plantas de producción de bioetanol utilizan la caña de azúcar como materia prima para generar biocombustibles E10 y E8 (porcentaje de etanol) para algunos departamentos, cuenta con excelentes condiciones climáticas y geográficas para la inversión de más plantas productivas con el fin de conseguir un porcentaje que pueda destacarse a nivel mundial. Dentro de los artículos e investigaciones abordadas en esta revisión no se ha considerado la posibilidad de aprovechar residuos municipales para la producción de bioetanol de segunda generación.

## 6. Referencias

- Achinas, S., & Euverink, G. J. W. (2016, September 1). Consolidated briefing of biochemical ethanol production from lignocellulosic biomass. *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol. 23, pp. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.07.006>
- Álvarez, C. M. (2010). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, (359), 63–89.
- Amarís, J., Manrique, D., & Jaramillo, J. (2015). Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustión interna. una revisión. *El Reventón Energético*, 13, 23–34. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revfue.v13n2-2015003>
- Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., & Kumar, S. (2014, August 1). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 36, pp. 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.047>
- Brandt, A., Gräsvik, J., Hallett, J. P., & Welton, T. (2013, February 25). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green Chemistry*, Vol. 15, pp. 550–583. <https://doi.org/10.1039/c2gc36364j>
- Carriazo Guevara, K., & Tarras Garcia, P. paola. (2012). *Estudio de factibilidad para una planta de bioetanol a partir del aprovechamiento de cascara de plátano en la empresa Colombian Biofuel S.A.S.* Universidad de Cartagena.
- Castro Martínez, Cl., Beltrán Arredondo, L. I., & Ortiz Ojeda, J. C. (2012). Producción de Biodiesel y Bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? *Ra Ximhai*, 8(3b), 93–100.
- Chan, B., & Martínez, E. (2018). Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de

- materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrotratamiento. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 31, 1–15. Retrieved from [www.riiit.com.mx](http://www.riiit.com.mx)
- Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química - RSEQ*, 115(5), 399–407. Retrieved from <http://analesdequimica.com/115-5/1155-chavez.pdf>
- Chen, W. H., Lin, Y. Y., Liu, H. C., Chen, T. C., Hung, H. C., & Chen, C. H. (2019). Analysis of physicochemical properties of liquefaction bio-oil from food waste. *Energy Procedia*, 158, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.036>
- Colmenares-Quintero, R. F., Rico-Cruz, C. J., Stansfield, K. E., & Colmenares-Quintero, J.C. (2020). Assessment of biofuels production in Colombia. *Cogent Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1740041>
- Cortes Ortiz, W. G. (2014). Tratamientos aplicables a materiales lignocelulósicos para la obtención de etanol y productos químicos. *Revista de Tecnología*, 13, 39–44. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6041572>
- Cuervo, L., Folch, J. L., & Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. *Bioresource Technology*, 13(3), 11–25. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266610846>
- Delgado, J. E., Salgado, J. J., & Perez, R. (2015). Perspectivas de los biocombustibles en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 13–28. <https://doi.org/10.22395/riium.v14n27a1>
- Dias, M. O. S., Junqueira, T. L., Cavalett, O., Cunha, M. P., Jesus, C. D. F., Rossell, C. E. V., ... Bonomi, A. (2012). Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*, 103(1), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.120>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera Bosques*, 20(3), 11–24. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203148>
- Fatma, S., Hameed, A., Noman, M., Ahmed, T., Sohail, I., Shahid, M., ... Tabassum, R. (2018). Lignocellulosic biomass: A sustainable bioenergy source for future. *Protein & Peptide Letters*, 25(March). <https://doi.org/10.2174/0929866525666180122144504>



- Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (2019). Retrieved July 31, 2020, from [http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar\\_info-titulo-Alcohol\\_Carburante\\_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)
- Flórez Ramos, D. (2016). *Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación de cuesco de palma de aceite peletizado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Garver, M. P., & Liu, S. (2014). Development of Thermochemical and Biochemical Technologies for Biorefineries. In *Bioenergy Research: Advances and Applications* (pp. 457–488). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59561-4.00027-9>
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Peña, J. D. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Informacion Tecnologica*, 23(6), 73–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000600009>
- Grotewold, E., Jones Prather, K. L., & Peters, K. (2015). *Lignocellulosic Biomass for Advanced Biofuels and Bioproducts: Workshop Report, Washington, DC, June 23-24, 2014*. <https://doi.org/10.2172/1471542>
- Guirao Goris, S. J. A. (2015). Utilidad y tipos de revisión de literatura. *Santa Cruz de La Palma*, 9(2). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.4321/S1988-348X2015000200002>
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009, January 1). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
- Hernández, C. A. (2012). Apuesta biotecnológica: etanol de segunda generación. *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de La Universidad Veracruzana*, 26(1). Retrieved from <file:///C:/Users/angie/Downloads/Apuestabiotecnologica.pdf>
- Houfani, A. A., Anders, N., Spiess, A. C., Baldrian, P., & Benallaoua, S. (2020, March 1). Insights from enzymatic degradation of cellulose and hemicellulose to fermentable sugars— a review. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 134, p.105481.... <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105481>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energia. (2009). Biomasa:Gasificación. *InEnergías renovables* (pp. 1–32). Madrid,España.
- Jambo, S. A., Abdulla, R., Mohd Azhar, S. H., Marbawi, H., Gansau, J. A., & Ravindra, P. (2016). A review on third generation bioethanol feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 756–769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.064>

- Jimoh, A. A., & Lin, J. (2019, November 30). Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 184, p. 109607. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109607>
- Kratky, L., & Jirout, T. (2011, March 1). Biomass size reduction machines for enhancing biogas production. *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 34, pp. 391–399. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000357>
- Lara, L., Arcos, F., Palazulos, R., & Acosta, M. (2016). ¿Como Afecta la Basura a la Sociedad ?
- Lauzurique-Guerra, Y., Zumalacárregui-de Cárdenas, L., Pérez-Ones, O., & Molina-Rivero, G. (2017). Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación. *DYNA (Colombia)*, 84(200), 185–192. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.54230>
- Lauzurique Guerra, Y., Péres Ones, O., Zumalacárregui de Cárdenas, L., & Rojas Mateo, D. (2017). Simulación de la destilación extractiva con sales para la obtención de etanol deshidratado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química.*, 16(3), 1053–1064.
- Liu, K., Atiyeh, H. K., Stevenson, B. S., Tanner, R. S., Wilkins, M. R., & Huhnke, R. L. (2014). Continuous syngas fermentation for the production of ethanol, n-propanol and n-butanol. *Bioresource Technology*, 151, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.059>
- López González, L. M., Pereda Reyes, I., Escobar Ramón, R., Pedraza Garciga, J., & Romero Romero, O. (2018). Efecto de la aplicación de métodos de pre-tratamientos en el proceso de digestión anaerobia de la biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química*, 38(2224–6185). Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000200010](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200010)
- Maczyńska, J., Krzywonos, M., Kupczyk, A., Tucki, K., Sikora, M., Pińkowska, H., ... Wielewska, I. (2019). Production and use of biofuels for transport in Poland and Brazil – The case of bioethanol. *Fuel*, 241, 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.116>
- Malagón Micán, M. L., Paéz, A. I., Santos Aguilar, J., Zabala García, D., Serna, F., Barrera, L., ... Hidalgo, B. Q. (2015). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. *Lasallista de Investigacion*, 10(1), 56–65. <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n2-2015003>
- Malmgren, A., & Riley, G. (2018). Biomass power generation. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11014-0>



- Miao, Z., Grift, T. E., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2013, January). An overview of lignocellulosic biomass feedstock harvest, processing and supply for biofuel production. *Biofuels*, Vol. 4, pp. 5–8. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.76>
- Morelos Gómez, J. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina. *Estudios Gerenciales*, 32(139), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.01.001>
- Mu, D., Seager, T., Rao, suresh P., & Zhao, F. (2010). Comparative life cycle assessment of lignocellulosic ethanol production: Biochemical versus thermochemical conversion. *Environmental Management*, 46, 565–578.
- Nikodinovic-Runic, J., Guzik, M., Kenny, S. T., Babu, R., Werker, A., & O'Connor, K. E. (2013). Carbon-rich wastes as feedstocks for biodegradable polymer (polyhydroxyalkanoate) production using bacteria. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 84, pp. 139–200). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407673-0.00004-7>
- Piñeros-castro, Y., Velasco, G. A., Proaños, J., & Cortes, W. (2011). Production of fermentables sugars by enzymatic hydrolysis of steam-exploded rice husks. *Revista Ion*, 24(2), 23–28.
- Qi, J., Li, Y., Xue, J., Qiao, R., Zhang, Z., & Li, Q. (2020). Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and energy-saving extractive distillation for separating the acetonitrile- water mixtures. *Separation and Purification Technology*, 238(October 2019), 116487. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116487>
- Rebello, S., Anoopkumar, A. N., Aneesh, E. M., Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A. (2020, April 1). Sustainability and life cycle assessments of lignocellulosic and algal pretreatments. *Bioresource Technology*, Vol. 301, p. 122678. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122678>
- Rodriguez, L., Bermúdez, R., Pérez, C., Ocana, V., & Scott, A. (2011). *Termo-conversión de biomasa. Tendencias de investigación*.
- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los Biocombustibles. *El Cotidiano*, 157(redalyc.org), 75–82.
- Sánchez, A., Gutiérrez, A., Muñoz, J., & Rivera, C. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Tumbaga*, 5, 61–91. Retrieved from <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/194/163>
- Sector agroindustrial de la caña. (2017). *Más que azúcar , una fuente de energía renovable para*

el país.

- Seguí Gil, L., & Fito Maupoey, P. (2018). An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1224–1231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.284>
- Serrano-Ruiz, J. C., & Luque, R. (2011). Biocombustibles líquidos: procesos y tecnologías. *Real Sociedad Española de Química*, 107(4), 383–389.
- Serrato Sabogal, J. (2018). *Revisión del estado del arte de los diferentes tipos de pretratamiento usados en residuos de poda para ser aprovechado posteriormente* (Universidad católica de Manizales). Retrieved from [http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2130/Julio Henry Serrato Sabogal.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2130/Julio%20Henry%20Serrato%20Sabogal.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sharma, B., Larroche, C., & Dussap, C. G. (2020). Comprehensive assessment of 2G bioethanol production. *Bioresource Technology*, (June), 123630. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123630>
- Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A. (2016, January 1). Biological pretreatment of lignocellulosic biomass - An overview. *Bioresource Technology*, Vol. 199, pp. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.030>
- Spatari, S., Bagley, D. M., & MacLean, H. L. (2010). Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresource Technology*, 101(2), 654–667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.067>
- Speight, J. G. (2011). Distillation. In *The Refinery of the Future* (pp. 177–145). <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2041-2.10004-9>
- Torun, M. (2017). Radiation pretreatment of biomass. In Y. Sun & A. G. Chmielewski (Eds.), *Applications of ionizing radiation in materials processing* (pp. 447–460). Retrieved from [www.ichtj.waw.pl](http://www.ichtj.waw.pl)
- Valero, A., Valero, A., Calvo, G., & Ortego, A. (2018, October 1). Material bottlenecks in the future development of green technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 93, pp. 178–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.041>
- Vera Carrasco, O. (2009). Artículos de revisión cómo escribir artículos de revisión. *Rev Med La Paz*, 15(1), 63–69.

- Vergara Alarcón, P. (2019). *Estudio del fraccionamiento de la lignocelulosa a mediante procesos con disolventes y los estudios para el análisis y aprovechamiento de las fracciones*. Universidad complutense de Madrid.
- Viñales Verde, M., Bell García, A., Michelena Álvarez, G., & Ramil Mesa, M. (2012). Obtención de etanol a partir de la biomasa lignocelulósica. *ICIDCA*, 46(1), 7–16.
- Zhang, Y., Cui, Y., Chen, P., Liu, S., Zhou, N., Ding, K., ... Ruan, R. (2019). Gasification technologies and their energy potentials. In *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches* (pp. 193–206). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64200-4.00014-1>
- Zheng, Y., Shi, J., Tu, M., & Cheng, Y.-S. (2017). Principles and development of lignocellulosic biomass pretreatment for biofuels. In *Advances in Bioenergy* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2017.03.001>
- Zhu, J. Y., & Pan, X. J. (2010). Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: Technology and energy consumption evaluation. *Bioresource Technology*, 101(13), 4992–5002. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.007>