



Publicación Cuatrimestral. Vol. 7, No Especial, Diciembre, 2022, Ecuador (p. 3-22). Edición continua

<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/index>

[revista.bdlaciencia@utm.edu.ec](mailto:revista.bdlaciencia@utm.edu.ec)

Universidad Técnica de Manabí

DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>

## TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO

Binnie Luzardo Gorozabel<sup>1\*</sup>, Enrique Ruíz Reyes<sup>2</sup>, Jean Carlos Pérez Parra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Química mención Química Ambiental. Instituto de Postgrado. Universidad Técnica de Manabí. E-mail: [binnie.luzardo@utm.edu.ec](mailto:binnie.luzardo@utm.edu.ec)

<sup>2</sup>Departamento de Química. Instituto de Ciencias Básicas. Universidad Técnica de Manabí. E-mail: [enrique.ruiz@utm.edu.ec](mailto:enrique.ruiz@utm.edu.ec), [jean.perez@utm.edu.ec](mailto:jean.perez@utm.edu.ec)

\*Autor para la correspondencia: [binnie.luzardo@utm.edu.ec](mailto:binnie.luzardo@utm.edu.ec)

Recibido: 20-12-2021 / Aceptado: 25-06-2022 / Publicación: 1-12-2022

Editor Académico: Gretty Ettiene

### RESUMEN

El aumento en la emisión de gases contaminantes causado por las actividades antropogénicas derivadas de la utilización de combustibles fósiles, es una de los principales problemas ambientales al que se le está buscando solución mediante la implementación de energías alternativas, con el fin de minimizar los efectos del calentamiento global y brindar seguridad energética. El aprovechamiento de residuos es uno de estos enfoques, este propone la utilización de materiales de desecho para la creación de nuevos productos sin afectar los cultivos destinados a la alimentación u otros servicios de primera necesidad. Es por ello que en varias investigaciones se ha analizado la utilización de diferentes tipos de biomásas como fuente de energía renovable, debido a que son de fácil adquisición y pueden ser convertidas en combustibles. El objetivo del presente estudio fue analizar el estado del arte del uso de la biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención de biocombustibles de segunda generación a través de una revisión de la literatura de los últimos diez años. Se realizó la búsqueda del empleo de la misma como materia prima para su bioconversión a combustible de segunda generación, desde la identificación de la estructura y composición de la matriz lignocelulósica, pretratamientos y parámetros que influyen en su conversión, posible formación de subproductos de carácter inhibitor, producción de biocombustible en Latinoamérica y Ecuador, hasta las perspectivas futuras de su viabilidad. La revisión de la literatura destacó que la generación de biocombustible a partir de biomasa lignocelulósica es considerada como una alternativa a la demanda energética, siendo así una solución al aumento de la emisión de gases de efecto invernadero y a la generación de residuos.

**Palabras clave:** biomasa lignocelulósica, biocombustible, bioenergía, pretratamiento.

## TRANSFORMATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS INTO SECOND GENERATION BIOFUEL: STATE OF THE ART IN PRETREATMENT



## ABSTRACT

The increase in the emission of polluting gases caused by anthropogenic activities derived from the use of fossil fuels is one of the main environmental problems to which a solution is being sought through the implementation of alternative energies, in order to minimize the effects of global warming and provide energy security. Waste utilization is one of these approaches, which proposes the use of waste materials for the creation of new products without affecting food crops or other essential services. For this reason, several studies have analyzed the use of different types of biomasses as a source of renewable energy, since they are easy to acquire and can be converted into fuels. The objective of the present study was to analyze the state of the art of the use of lignocellulosic biomass as a raw material for obtaining second generation biofuels through a review of the literature of the last ten years. The use of lignocellulosic biomass as a raw material for bioconversion to second generation fuel was studied, from the identification of the structure and composition of the lignocellulosic matrix, pretreatments and parameters that influence its conversion, possible formation of inhibitory by-products, biofuel production in Latin America and Ecuador, to the future perspectives of its viability. The literature review highlighted that the generation of biofuel from lignocellulosic biomass is considered as an alternative to the energy demand, thus being a solution to the increase in greenhouse gas emissions and the generation of waste.

**Keywords:** lignocellulosic biomass, biofuel, bioenergy, pretreatment.

## TRANSFORMAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA EM BIOCOMBUSTÍVEL DE SEGUNDA GERAÇÃO: ESTADO DA ARTE EM PRÉ-TRATAMENTO

### RESUMO

O aumento da emissão de gases poluentes causados por actividades antropogénicas derivadas da utilização de combustíveis fósseis é um dos principais problemas ambientais para o qual se procura uma solução através da implementação de energias alternativas, a fim de minimizar os efeitos do aquecimento global e proporcionar segurança energética. A recuperação de resíduos é uma destas abordagens, que propõe a utilização de materiais residuais para a criação de novos produtos sem afectar as culturas alimentares ou outros serviços essenciais. Por esta razão, vários estudos analisaram a utilização de diferentes tipos de biomassas como fonte de energia renovável, uma vez que são fáceis de adquirir e podem ser convertidas em combustíveis. O objectivo do presente estudo era analisar o estado da arte da utilização da biomassa lignocelulósica como matéria-prima para a obtenção de biocombustíveis de segunda geração através de uma revisão da literatura dos últimos dez anos. A utilização de biomassa lignocelulósica como matéria-prima para a bioconversão para combustível de segunda geração foi investigada, desde a identificação da estrutura e composição da matriz lignocelulósica, pré-tratamentos e parâmetros que influenciam a sua conversão, possível formação de subprodutos inibidores, produção de biocombustíveis na América Latina e Equador, até às perspectivas futuras da sua viabilidade. A revisão da literatura destacou que a geração de biocombustível a partir de biomassa lignocelulósica é considerada como uma alternativa à procura de energia, sendo assim uma solução para o aumento das emissões de gases com efeito de estufa e para a geração de resíduos.

**Palavras-chave:** biomassa ligno-celulósica, biocombustível, bioenergia, pré-tratamento

---

Citación sugerida: Luzardo Gorozabel, B., Ruiz Reyes, E., Pérez Parra, J. (2022). Transformación de biomasa lignocelulósica en biocombustible de segunda generación: estado del arte del pretratamiento. Revista Bases de la Ciencia, 7 (Nro Especial), Diciembre, 3-22. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>

---



## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace unos años los combustibles fósiles han sido el único recurso energético utilizado por el hombre, representando el 80 % de la energía primaria consumida en el mundo (Raud *et al.*, 2019), sin embargo, su producción y utilización presenta desafíos, siendo el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero uno de ellos (Bach *et al.*, 2021; Muñoz *et al.*, 2018); además, debido a la naturaleza no renovable de los mismos se provoca un agotamiento de recursos, dando como resultado una desestabilización en el mercado energético (Sharma *et al.*, 2020; Soltanian *et al.*, 2020).

La emisión antropogénica de gases contaminantes a la atmósfera crea un aumento en los problemas ambientales, de modo que la búsqueda de alternativas se ve constituida como un aspecto de relevancia para el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible, mediante avances científicos y tecnológicos que realicen previsiones energéticas futuras (Gómez, 2016; Naciones Unidas, 2015).

Por ello, la bioenergía ha sido planteada como una alternativa a los combustibles fósiles brindando seguridad energética mediante la minimización en la emisión de gases de efecto invernadero (Groves *et al.*, 2018; Toogood & Scrutton, 2018; Vega-Quezada *et al.*, 2017), a su vez, es económica en comparación a otras fuentes energéticas (Randhawa *et al.*, 2017). Esta es obtenida de manera renovable a partir de materia orgánica (Gómez, 2016), y puede ser utilizada para la generación de energía térmica por combustión o con otra tecnología.

Años atrás se debatía sobre la producción de los biocombustibles debido a que prioritariamente eran obtenidos mediante cultivos destinados a la alimentación, ocasionando un incremento en el precio de los alimentos y otras desventajas como el consumo elevado de agua, uso de agroquímicos y deforestación. Debido a esto es que las recientes investigaciones se enfocan en una producción más verde de los biocombustibles, mediante la utilización de residuos, algas o aplicando nuevas herramientas de biología sintética (Kumari & Singh, 2018).

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes de energía más abundante y representa aproximadamente el 70 % de la producción de energía renovable (Khuenkao & Tippayawong, 2020; Raud *et al.*, 2019). Es una alternativa al ser un material atractivo debido a su fácil adquisición y múltiples aplicaciones, por ejemplo, la producción de biocombustible (Srivastava *et al.*, 2019).

Según Amiri y Karimi (2018), el contenido energético de la biomasa lignocelulósica es de fácil conversión en calor o electricidad mediante la combustión, sin embargo, requiere de un tratamiento adecuado, puesto que la separación de sus componentes no es eficiente. La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, estos tres componentes tienen interacciones muy cercanas entre sí en la pared celular (Karimi, 2015; Susheel, 2018).

La lignina actúa como pegamento entre las fibras de modo que limita la degradación de la celulosa y hemicelulosa para la obtención de productos (Kikas *et al.*, 2016). A pesar que el porcentaje total del contenido de lignina varía dependiendo del origen de la biomasa, este es un parámetro crucial que afecta la eficiencia en la descomposición de los polisacáridos (Srivastava *et al.*, 2019), por ello varios estudios exploran diferentes tratamientos para remover la lignina del material lignocelulósico (P. V. Kumar & Sulaiman, 2016; Kumari & Singh, 2018; Salinas & Gasca, 2009).

Es una realidad que las tecnologías para el procesamiento de biomasa lignocelulósica se encuentran en desarrollo, sin embargo, bajo la perspectiva de cambio a una sociedad moderna y sostenible, es necesario realizar progresos que sean significativos en términos de perfeccionamiento del proceso de producción (Mahmood *et al.*, 2019; Raud *et al.*, 2019). En este artículo se hace una revisión sobre el uso de la biomasa lignocelulósica como materia prima para la obtención de biocombustibles de segunda generación, haciendo énfasis en el estado del arte de la etapa del pretratamiento de la biomasa, a través de una consulta de la literatura de los últimos diez años.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

El desarrollo de la investigación se realizó mediante una revisión de la literatura, estableciendo palabras claves como biomasa lignocelulósica, biocombustibles, bioenergía y lignocelulosa, con la finalidad de delimitar la búsqueda bibliográfica en las diferentes bases de datos (Scopus, Sciencedirect, Taylor&Francis, Scielo, Redalyc). La investigación se enfocó desde la identificación de la estructura y composición de la matriz lignocelulósica, pretratamientos y parámetros que influyen en su conversión, posible formación de subproductos de carácter inhibitor, producción de biocombustible en Latinoamérica y Ecuador, y las perspectivas futuras de su viabilidad. Los documentos revisados fueron de carácter experimental, artículos científicos, capítulos de libros y tesis doctorales.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Biomasa lignocelulósica**

### 3.1.1. Estructura y composición

Se define la biomasa como todo material orgánico que es derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009), es así que varios estudios han demostrado la efectividad de su uso como sustituto a los combustibles fósiles (Behera *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2020; Raud *et al.*, 2019).

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes orgánicas renovables más abundantes con un rendimiento anual en aumento de 200 mil millones de toneladas (N. Xu *et al.*, 2019) producida a gran escala a partir de los residuos: industriales, agroindustriales, domésticos, entre otros (Bilal *et al.*, 2020; Srivastava *et al.*, 2019). La composición de la biomasa varía dependiendo de la fuente de obtención (**Tabla 1**), no obstante, se distinguen tres componentes principales: celulosa (13-48 %), hemicelulosa (14,8-60 %) y lignina (8,2-30 %), estos componentes tienen interacciones cercanas entre ellos en la pared celular, de modo que el resultado es una estructura tridimensional única (Bilal *et al.*, 2020; Karimi, 2015).

**Tabla 1.** Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de algunos residuos agrícolas.

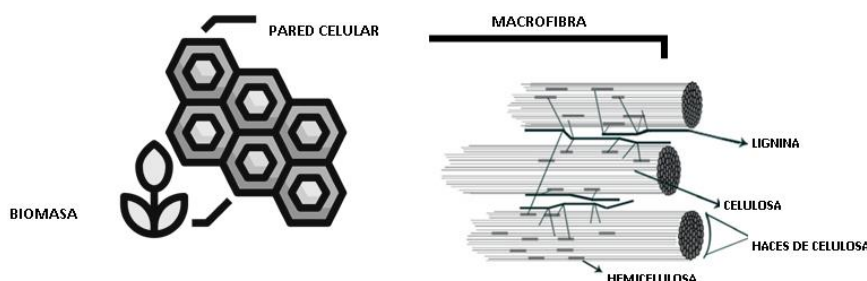
Residuo	Composición porcentual		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Bagazo de caña	42	25	20
Cascara de arroz	28,7 – 35,6	11,96 – 29,3	15,4 – 20
Fibra de coco	20 – 48	35 – 60	15 – 28
Mazorca de maíz	32,3 – 45,6	39,8	6,7 – 13,9
Paja de arroz	32,1 – 31,1	24 – 22,3	18- 13,3
Paja de maíz	42,6	21,3	8,2
Pasto	25 – 40	35 – 50	10 – 30
Residuos de banano	13 – 13,2	15 – 14,8	14

**Fuente:** Bilal *et al.*, 2020; Haghighi Mood *et al.*, 2013; Kumari & Singh, 2018; Menon & Rao, 2012; Raud *et al.*, 2019

En la pared celular, la lignina se relaciona con la celulosa y hemicelulosa mediante enlaces covalentes protegiéndolos de ataques de patógenos o degradación por microorganismos y enzimas (**Figura 1**) (Magalhães *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2020). Las estructuras tridimensionales formadas por los polisacáridos y la lignina crean sustancias recalcitrantes que inhiben procesos como la hidrólisis en la digestión anaerobia (Yao, 2016).

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la tierra y el principal componente estructural de la pared celular de las plantas (Kikas *et al.*, 2016; Srivastava *et al.*, 2019), es un

polisacárido lineal no ramificado que está constituido por varias unidades de glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 glucosídicos (Bilal *et al.*, 2020). Al unirse, las cadenas de celulosa forman una estructura cristalina a través de enlaces de hidrógeno e interacciones de Van der Waals que forman microfibrillas y estas pueden alcanzar varios miles de unidades de glucosa (Kumari & Singh, 2018; Magalhães *et al.*, 2019).



**Figura 1.** Representación de la estructura de la biomasa lignocelulósica.

**Fuente:** Adaptado de Yao (2016).

La hemicelulosa es un heteropolisacárido, variable y amorfo que se encuentra situado entre la lignina y fibras de celulosa (Qian, 2013; Yousuf *et al.*, 2019), es un polímero de menor masa molecular en comparación a la celulosa, y consta de diferentes tipos de azúcares, en los cuales se incluyen pentosas, hexosas y ácidos acetilados, los mismos pueden estar lineales o ramificados (Magalhães *et al.*, 2019; Yousuf *et al.*, 2019). Detrás de la diferencia en la composición química, la hemicelulosa difiere de la estructura de la celulosa por otros aspectos como el tamaño de la cadena, la cual es mucho menor, y su poca resistencia a los productos químicos (Kumari & Singh, 2018).

La lignina es el tercer componente de la biomasa lignocelulósica, es un heteropolímero amorfo (no cristalino) que consta de tres unidades diferentes de fenilpropano (alcohol p-cumarílico, coniferílico y sinapílico) (Ge *et al.*, 2018; A. Kumar & Chandra, 2020), formando un sello protector que proporciona rigidez y cohesión al material de la pared celular. Es un polímero recalcitrante debido a sus cualidades bioquímicas y de naturaleza hidrofóbica unido fuertemente a polímeros de celulosa y hemicelulosa (Bilal *et al.*, 2020; Kumari & Singh, 2018).

Además de la composición principal, se encuentran involucradas en la recalcitrancia de la biomasa también las proteínas, lípidos, pectina, minerales y otros compuestos (N. Xu *et al.*, 2019).

### 3.1.2. Pretratamiento



La conversión de biomasa lignocelulósica permite la producción de combustibles y productos de valor agregado de materia prima de bajo costo (Qian, 2013), no obstante, debido a la composición de la misma su procesamiento presenta dificultades a menos que se desarrollen procedimientos económicamente viables y efectivos para eliminar o modificar la lignina (Menon & Rao, 2012; Srivastava *et al.*, 2019).

El pretratamiento es un paso crucial para el proceso de conversión de biomasa a biocombustible, para ello se requiere alterar la estructura y composición química de la biomasa lignocelulósica de modo que se convierta en componentes más simples, se remueva la lignina, se preserve la hemicelulosa y se reduzca la cristalinidad de la celulosa, así los ácidos o enzimas pueden fácilmente tener acceso a la misma e hidrolizarla en monómeros, estos pretratamientos permiten aumentar el área de superficie y la porosidad de la biomasa (Behera *et al.*, 2014; Kumari & Singh, 2018).

La estructura nativa de la lignocelulosa juega un papel importante en la hidrólisis de la biomasa durante el pretratamiento (P. V. Kumar & Sulaiman, 2016). La elección del pretratamiento debe ser compatible con la materia prima, enzimas y organismos a utilizar. Los pretratamientos pueden ser divididos en: físicos, fisicoquímicos, químicos, biológicos o combinación de los anteriores (Behera *et al.*, 2014; Menon & Rao, 2012). En la **Tabla 2** se muestran los diferentes tipos de pretratamiento para la biomasa lignocelulósica.

### **3.1.2.1. Métodos físicos**

Generalmente, los métodos físicos son el primer paso para el procesamiento de la biomasa lignocelulósica. Dentro de los métodos se encuentra la trituración, congelación, irradiación y extrusión (**Tabla 2**). Es así que estos son utilizados para mejorar la hidrólisis enzimática o biodegradabilidad de la biomasa (Menon & Rao, 2012; N. Xu *et al.*, 2019). Mediante la utilización de los mismos se incrementa el área de superficie de los materiales lignocelulósicos, disminuye el tamaño de partícula, la cristalinidad y el grado de polimerización de la celulosa (Behera *et al.*, 2014; Kumari & Singh, 2018).

La trituración es el método principalmente utilizado en las investigaciones, sin embargo, no existe suficiente información sobre el consumo de energía durante el proceso; y teniendo en cuenta el alto requerimiento energético de la trituración a escala industrial y el aumento de la demanda de energía, se puede asumir que es poco probable la viabilidad económica de este proceso (Behera *et al.*, 2014). Es importante destacar que varios de estos métodos de pretratamiento no son efectivos al ser utilizados solos, sino que se usan en combinación con otros.

**Tabla 2.** Pretratamientos para biomasa lignocelulósica.

	Método	Efecto	Referencia
Físico	Trituración	Disminución del tamaño de partícula, grado de polimerización y cristalinidad.	(Haghighi Mood <i>et al.</i> , 2013; Kumari & Singh, 2018)
	Congelación	Destrucción de la estructura celular.	(Kumari & Singh, 2018)
	Irradiación	Remoción de lignina y hemicelulosa.	(Hoang <i>et al.</i> , 2021; Mankar <i>et al.</i> , 2021)
	Extrusión	Disminución del tamaño de partícula, grado de polimerización y cristalinidad (tratamiento termofísico).	(Khan <i>et al.</i> , 2022; Mankar <i>et al.</i> , 2021)
Químico	Ácido (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico)	Disolución de hemicelulosa, disminución de la polimerización de celulosa.	(Vasaki <i>et al.</i> , 2022; Yiin <i>et al.</i> , 2021)
	Alcalino (hidróxido de sodio, óxido de calcio)	Disolución de lignina y una parte de hemicelulosa, disminución del grado de polimerización, incremento del área superficial.	(Khan <i>et al.</i> , 2022)
	Oxidación	Remoción de lignina y hemicelulosa.	(Sarker <i>et al.</i> , 2021)
	Ozonólisis	Descomposición de lignina y hemicelulosa, aumento de la biodegradabilidad de celulosa mediante ozono.	(Mulakhudair <i>et al.</i> , 2017)
	Líquidos iónicos	Disolución selectiva de componentes de la biomasa.	(Azizan <i>et al.</i> , 2022)
	Organosolvolisis	Fraccionamiento y disolución de componentes de biomasa especialmente lignina.	(Khan <i>et al.</i> , 2022)
	Explosión de vapor	Destrucción de biomasa durante la descompresión y disolución de hemicelulosa.	(Sarker <i>et al.</i> , 2021)
Físicoquímicos	Agua caliente (LHW)	Solubilización de hemicelulosa.	(Gundupalli <i>et al.</i> , 2022)
	Oxidación húmeda	Fraccionamiento de materiales lignocelulósicos por solubilización e hidrólisis de hemicelulosas y deslignificación.	(Kumari & Singh, 2018)
	Explosión con CO <sub>2</sub>	Destrucción de biomasa durante la descompresión y disolución de hemicelulosa.	(Mussatto <i>et al.</i> , 2021)
	Explosión de fibras de amoníaco	Fraccionamiento del complejo lignina-carbohidrato, incremental la digestibilidad de la biomasa.	(Li <i>et al.</i> , 2022; Rojas-Sossa <i>et al.</i> , 2019)
Biológicos	Enzimáticos	Degradación de lignina a través de ruptura oxidativa.	(Li <i>et al.</i> , 2022; Yoon <i>et al.</i> , 2022)
	Hongos	Degradación de lignina.	(Raud <i>et al.</i> , 2019)
	Consorcio de microorganismos	Degradación de celulosa y hemicelulosa.	(Haghighi Mood <i>et al.</i> , 2013; Kumari & Singh, 2018; Raud <i>et al.</i> , 2019)

**Fuente:** Elaboración propia.



### 3.1.2.2. Métodos químicos

Se utilizan productos químicos como ácidos, bases, solventes orgánicos, líquidos iónicos, agentes oxidantes, entre otros, para descomponer la biomasa lignocelulósica. (Behera *et al.*, 2014; N. Xu *et al.*, 2019). Las características más relevantes de estos métodos es la poca selectividad y eficiencia de los diferentes componentes de la lignocelulosa y su objetivo es mejorar la biodegradabilidad de la celulosa mediante la eliminación de lignina y/o hemicelulosa (Amiri & Karimi, 2018; Menon & Rao, 2012).

Los pretratamientos alcalinos son uno de los métodos más usados y presenta múltiples ventajas como la solubilización de la lignina, prevención de la disminución del pH durante el proceso de acidogénesis, bajo costo de operación, baja degradación de holocelulosa y baja formación de inhibidores (Yao, 2016).

Por otro lado, en el caso de los pretratamientos ácidos Mahmood *et al.* (2019) mencionan que, en el pretratamiento con ácidos, se puede obtener mejores resultados si se utiliza un ácido diluido a altas temperaturas.

A pesar de presentar ventajas, estos métodos de pretratamiento presentan desventajas como la formación de compuestos tóxicos, pérdida de carbohidratos, generación de residuos e incremento en los costos debido a los productos químicos usados en el proceso (Raud *et al.*, 2019).

### 3.1.2.3. Métodos fisicoquímicos

En los métodos fisicoquímicos se combinan técnicas de los métodos anteriormente mencionados, de modo que se destruya la estructura de la biomasa, separando la lignina y hemicelulosa mediante condiciones establecidas (presión y temperatura), permitiendo una mejor accesibilidad a la celulosa por parte de las enzimas hidrolíticas (Behera *et al.*, 2014).

La eficiencia de estos procedimientos depende de los disolventes usados y las condiciones en las que estos afectan a las propiedades de la biomasa, sin embargo, son aplicados en diferentes tipos de biomasa, ya que poseen la capacidad de mejorar la eficiencia de la biomasa lignocelulósica hacia la producción de azúcares (Haldar & Purkait, 2021). Según Kumari & Singh (2018) el método con agua caliente (LHW) es un método que presenta mayor eficiencia en el tratamiento de biomasa con bajo contenido de lignina. En la **Tabla 2** se encuentran los métodos fisicoquímicos en detalle.

### 3.1.2.4. Métodos biológicos

Como métodos alternativos a los usuales, los métodos biológicos aparecen como prometedores con muchas ventajas pues no requieren de la utilización de químicos, necesitan poca energía y condiciones ambientales normales. Estos métodos utilizan microorganismos y sistemas enzimáticos para modificar la estructura de la biomasa lignocelulósica; se clasifican en tres categorías: hongos, enzimas y consorcio microbiano (Baramée *et al.*, 2020; N. Xu *et al.*, 2019).

Los microorganismos utilizados son hongos de podredumbre blanda, hongos de degradación de madera (blancos y café) y bacterias, estos modifican la estructura de la biomasa lignocelulósica para que esta sea más susceptible a la digestión enzimática. Durante el pretratamiento biológico las enzimas ligninolíticas actúan para desbloquear la estructura compleja de la lignina en la pared celular para que así la celulosa sea convertida en celulosa (Menon & Rao, 2012; Raud *et al.*, 2019; Yao, 2016).

La degradación del sustrato por los microorganismos dura semanas para lograr resultados deseados, de modo que este método es considerado un proceso lento que requiere de gran espacio y mucho control, no obstante, a pesar de que es un tratamiento poco viable comercialmente es amigable con el medio ambiente, selectivo y eficiente, con base en ello se incrementa el interés para el desarrollo de esta tecnología (Behera *et al.*, 2014; Muthukumarappan & Swamy, 2020).

### 3.1.3. Inhibidores

Es inevitable que durante el pretratamiento de la biomasa se generen diferentes subproductos que tienen efecto inhibitor en la fermentación. Compuestos como furanos, ácidos débiles, o derivados fenólicos pueden obstaculizar la actividad de los microorganismos, en consecuencia, cesan la fermentación del hidrolizado pretratado (Soltanian *et al.*, 2020).

En la **Tabla 3** se mencionan algunos de los efectos de la generación de inhibidores en el proceso de la fermentación los cuales se mencionan.

Para reducir los efectos producidos por los inhibidores es necesario desintoxicar el hidrolizado o adaptar los microorganismos a estos compuestos inhibidores.

**Tabla 3.** Efectos de inhibidores sobre el crecimiento microbiano y la fermentación.

Inhibidor	Efectos
Ácidos débiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El ácido débil en forma no disociada penetra a través y dentro de las células para liberar el anión y protón que altera el pH intracelular.</li> <li>- El ácido fórmico tiene una mayor permeabilidad y toxicidad que el ácido acético.</li> <li>- Los aniones de los ácidos débiles afectan a la presión de turgencia celular e inhiben el crecimiento.</li> <li>- Los ácidos fórmico y propiónico ralentizan la síntesis de macromoléculas (ADN, ARN y proteínas).</li> </ul>
Derivados fenólicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los compuestos fenólicos son más tóxicos que los alifáticos o los furanos con los mismos grupos funcionales.</li> <li>- La vainillina causa una interrupción parcial del gradiente de <math>K^+</math> en los microbios.</li> <li>- Son capaces de inhibir la actividad de varias hidrolasas lignocelulósicas.</li> <li>- Muestra un efecto antiincrustante sobre la formación de biopelículas en bacterias Gram negativas.</li> </ul>
Furanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Furfural es un inhibidor clave del hidrolizado lignocelulósico, además actúa como mutágeno y causa roturas del ADN de doble hebra.</li> <li>- El ácido 2-furoico y el alcohol furfurílico provocan fugas en la membrana.</li> <li>- Tienen efectos negativos sobre las enzimas fermentativas y glucolíticas.</li> </ul>

**Fuente:** Bhatia *et al.*, 2020.

### 3.1.4. Parámetros del pretratamiento

Además de las características que cada pretratamiento presenta sobre la eficiencia en la degradación de la lignina, existen diferentes parámetros que influyen en el mismo. Factores como la cristalinidad de la biomasa, el grado de polimerización, accesibilidad de la superficie y el contenido de lignina y hemicelulosa se desarrollan a continuación:

#### 3.1.4.1. Cristalinidad de la biomasa

La celulosa es un polímero que se encuentra en diferentes proporciones entre biomásas, debido a ello esta puede estar en dos formas: amorfa y cristalina. La cristalinidad de la celulosa se refiere a la proporción de la región cristalina de la celulosa, que generalmente varía entre el 30 y el 80 %. Los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals son las principales fuerzas que actúan para formar la estructura cristalina (N. Xu *et al.*, 2019). La cristalinidad de la celulosa hace que la biomasa sea altamente resistente al ataque enzimático y químico y, por tanto, reduce la hidrólisis de la biomasa (Arora *et al.*, 2019).

En la hidrólisis ácida la resistencia se da debido al lado hidrofóbico de las fibrillas de la celulosa cristalina, mientras que la resistencia a la hidrólisis enzimática se da por la fuerza que ejerce la

red de enlaces de hidrógeno entre cadenas (Behera *et al.*, 2014), además, la disminución de la cristalinidad aumenta la digestibilidad de las lignocelulosas (Islam *et al.*, 2020).

#### **3.1.4.2. Grado de polimerización**

El grado de polimerización de la celulosa se refiere al número de unidades de monómeros presentes en la cadena (Arora *et al.*, 2019; Karimi & Taherzadeh, 2016). Este es un factor importante que afecta a la hidrólisis enzimática, además se conoce que existe relación entre la longitud de la cadena de monómeros y la reducción del grado de polimerización tras el pretratamiento (Behera *et al.*, 2014; N. Xu *et al.*, 2019).

Largas cadenas de celulosa contienen muchos enlaces de hidrógeno y esto dificulta la hidrólisis, mientras que las cadenas cortas de celulosas son más reactivas a las enzimas y contienen menos enlaces de hidrógeno, por ende, es fácil para las enzimas acceder. Es de esperar que, al incrementar la susceptibilidad de la celulosa a la hidrólisis, se disminuya el grado de polimerización (Karimi & Taherzadeh, 2016).

#### **3.1.4.3. Accesibilidad al área de superficie**

Una eficiente hidrólisis enzimática toma lugar debido al contacto físico entre las fibrillas de celulosa y las subunidades enzimáticas. El área de superficie en materiales lignocelulósicos se clasifica en superficie externa e interna. El área de la superficie externa está relacionada con el tamaño y la forma de las partículas, mientras que el área de la superficie interna depende de la estructura capilar de las fibras celulósicas (Arora *et al.*, 2019; Behera *et al.*, 2014).

Existen también factores limitantes en la hidrólisis enzimática de la biomasa, uno de ellos es el tamaño de los poros. La accesibilidad de las enzimas al área de superficie da muestra a un crecimiento en el tamaño del poro de la celulosa. Al eliminar la hemicelulosa aumenta el tamaño medio de los poros y, por lo tanto, aumenta la probabilidad de que la celulosa se hidrolice, no obstante, el secado de la lignocelulosa en el pretratamiento puede causar un colapso en la estructura de los poros, lo que resulta en una disminución de la tasa de hidrólisis enzimática (N. Xu *et al.*, 2019).

#### **3.1.4.4. Contenido de lignina y hemicelulosa**

La recalcitrancia es una de las principales características de la biomasa lignocelulósica, esto es causado por la compleja estructura que posee la misma (Choi *et al.*, 2019). De manera general, la biomasa lignocelulósica contiene 40 – 50 % de celulosa, 20 – 40 % hemicelulosa, y 20 – 30 % de lignina; la presencia de lignina y hemicelulosa hace que el acceso de las enzimas a la celulosa

sea dificultoso de modo que se reduce la eficiencia de la hidrólisis enzimática (Behera *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2019; Takada *et al.*, 2020).

La hemicelulosa obstaculiza la hidrólisis enzimática de la celulosa ya que posee enlaces covalentes con la lignina, de modo que forma complejos lignina-carbohidrato. La lignina en las paredes celulares lignocelulósicas restringe el acceso de la enzima celulasa a la celulosa ya que bloquea la progresión de la escisión de las cadenas de celulosa por las celulasas (Gill *et al.*, 2021).

Trabajando en condiciones normales, la lignina disminuye la tasa de hidrólisis lo que reduce el contacto entre el catalizador y los polímeros de hemicelulosa. Por otro lado, si las condiciones de reacción son lo suficientemente fuertes como para alterar la estructura de la lignina, su descomposición podría generar productos no deseados (Rapado *et al.*, 2021)

### 3.2. De biomasa a combustible de segunda generación

La energía renovable se refiere a la energía que puede ser reciclada de la naturaleza (H. Xu *et al.*, 2020). La biomasa es una alternativa energética frente al uso de los recursos no renovables, principalmente la conversión de esta, la cual se da en tres pasos: pretratamientos para la destrucción de la pared celular, hidrólisis enzimática para la liberación de azúcares solubles y fermentación para la producción de biocombustible (Huang *et al.*, 2019; Jin *et al.*, 2019).

El desarrollo de los biocombustibles se analiza bajo el estudio de “generaciones” basados en la materia prima y la metodología de conversión (**Tabla 4**) (Sharma *et al.*, 2020). Los combustibles de segunda generación se producen usando tecnologías para convertir la biomasa lignocelulósica (residuos agrícolas, domésticos, entre otros.) en biocombustibles evitando así la problemática del reemplazo de cultivos para alimentos por cultivos para combustible (Groves *et al.*, 2018; Randhawa *et al.*, 2017).

**Tabla 4.** Clasificación de generaciones de biocombustibles basados en su materia prima o metodología de conversión.

Generación	Materia prima/metodología de conversión
Primera	Biomasa comestible (caña de azúcar, maíz o granos de soya, harina, aceite vegetal, entre otros.)
Segunda	Biomasa residual/lignocelulósica (materia prima forestal o agrícola, residuos municipales, entre otros.)
Tercera	Materia prima acuática cultivada (algas)
Cuarta	Microorganismos de bioingeniería, cultivos modificados.

**Fuente:** Groves *et al.*, 2018; Randhawa *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2020.

La ventaja en la producción de este tipo de energía es la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero debido al ciclo cerrado de CO<sub>2</sub>, la transformación a bioproductos sólidos,

líquidos y gaseosos, bajo costos en adquisición de materia prima, maximiza beneficios económicos y medio ambientales, disminuye residuos, entre otros. (Brazil *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2020).

### 3.3. Producción de biocombustibles en Latinoamérica y Ecuador

Mundialmente la producción de biocombustibles se ha incrementado; se prevé que alcance un aumento de 140 miles de millones de litros (MmL) de etanol y para el caso del biodiesel, alcance casi 46 MmL para el 2029 (Rey-Porras *et al.*, 2021). La utilización de estos bioproductos no solo mitiga los efectos producidos por los gases de efecto invernadero, sino que responde a la problemática de la demanda energética.

En Latinoamérica, la producción de biocombustibles es liderada por Brasil, Argentina y Colombia, (Gómez, 2016; Rey-Porras *et al.*, 2021). Brasil ha estado apuntando a la mejora tecnológica y productiva mediante la creación de programas y leyes (Álvarez, 2009) al igual que Argentina y Colombia, con la finalidad de alcanzar las metas propuestas por los objetivos de desarrollo sostenible.

En el año 2004, el gobierno brasileño crea el Plan Nacional de Producción y uso de biocombustibles con la finalidad de dar uso al exceso de aceite de soya que se producía en el país, además de crear oportunidades para los agricultores vulnerables (Santana, 2021). En el caso de Argentina, con los programas RenovaBio y Rota 2030 se pretende descarbonizar el transporte a partir del uso de biocombustibles, de esta manera se impulsa la investigación, desarrollo e innovación en la mejora de la eficiencia energética de los vehículos (Hilbert & Caratori, 2021).

En Ecuador, la utilización de biocombustibles se da a partir de la emisión del Decreto Ejecutivo N° 1303, en el cual se declara de interés nacional el desarrollo de biocombustibles para el impulso del fomento agrícola (Presidencia del Ecuador, 2012). De este modo, Ecuador se ha encontrado en una etapa de transición en cuanto a energía se refiere, teniendo como objetivo el reemplazo de gasolina regular a gasolina mezclada hasta un máximo de 10 % de etanol anhidro (E10) y 90 % de gasolina regular (Guerrero & Muñoz, 2018).

Las autoridades gubernamentales del país buscan favorecer el desarrollo económico mediante diversas formas para mejorar la economía local, como la implementación de molinos rurales artesanales para la producción de combustible a partir de etanol anhidro (Velazquez-Martí *et al.*, 2016) además de proyectos como “Cero combustibles fósiles en Galápagos” con el objetivo de erradicar la utilización de combustibles fósiles en la isla (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2016).



También se ha implementado el proyecto "*Jatropha Curcas* para las Islas Galápagos" el cual se centra en la recolección de frutos de *J. Curcas* de cercas vivas a lo largo de las áreas rurales de la provincia de Manabí (Ecuador) para la extracción de aceite a pequeña escala (Narváez C. *et al.*, 2015); mediante la utilización del aceite extraído se reemplaza progresivamente el diésel, disminuyendo así el uso de combustibles fósiles en el archipiélago en aproximadamente un 50 % (Cañadas-López *et al.*, 2017).

El caso de estudio para el proyecto en el Archipiélago es la Isla Floreana en la que la demanda de electricidad no está cubierta por el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, pero sí por sistemas renovables donde destaca la electricidad generada a partir de aceite de *J. Curcas* (Muñoz Mayorga *et al.*, 2018). A pesar de que en el país actualmente se utiliza biocombustibles de primera generación para ser mezclados con gasolina regular, son varios los estudios que se encuentran buscando alternativas en la biomasa residual.

La Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación junto a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) ejecutaron la primera biorrefinería piloto como parte del cambio de la matriz energética y productiva. La refinería obtiene bioetanol a partir de desechos agrícolas como bagazo de banano, papa, palma africana, tagua, café, cacao, entre otros (Ortiz-Ulloa *et al.*, 2021; SENECHYT, 2014).

### **3.4. Viabilidad de uso de biomasa lignocelulósica**

La bioconversión de materiales lignocelulósicos tiene el potencial de convertirse en la principal fuente de energía alternativa debido a la abundancia de biomasa lignocelulósica en el planeta. No obstante, el principal problema es el alto costo de inversión y procesamiento, se requieren tecnologías e instalaciones avanzadas para el proceso de conversión.

A pesar de que en el tercer mundo, el desarrollo de tecnologías para la conversión aún no entra en auge, en Europa existen aproximadamente 803 biorrefinerías, las mismas tratan diferentes materias primas de carácter residual para la obtención de bioproductos, de los cuales el 45 % se dedica a la producción de biocombustibles (Parisi, 2018). Las mismas no consideran un solo método de pretratamiento para el procesamiento de la biomasa lignocelulósica puesto que es un ideal poco alcanzable, no obstante, los avances en la comprensión de la composición de las plantas, en relación a la estructura de la pared celular y sus características bioquímicas, ofrecen nuevas vías para el desarrollo de nuevos procesos de base biológica para la conversión de biomasa en biocombustible (Haghighi *et al.*, 2013).

Adicionalmente la selección y optimización del pretratamiento adecuado depende principalmente de la aplicación posterior que se le dé a la biomasa, es decir, si el pretratamiento es para la conversión del material lignocelulósico en biocombustibles o para biocompositos o químicos. De hecho, todos los pretratamientos exhiben sus propias imperfecciones o inconvenientes, y un método no se puede aplicar a todas las clases de biomasa (Mahmood *et al.*, 2019).

Con respecto a la utilización de biomasa lignocelulósica, según Pérez-Arévalo & Velázquez-Martí (2018) en Ecuador los residuos de poda de áreas verdes pueden ser una gran fuente de materiales de biomasa; en su estudio evalúan la capacidad de propagación y el rápido crecimiento de la especie *Ficus Benjamina* y concluyen que, en base al bajo contenido de nitrógeno, el material es apropiado para el uso como materia prima para la producción de biocombustible.

Así mismo, Pazmiño-Hernandez *et al.* (2019) evalúan la viabilidad del pedúnculo de banano residual como materia prima para la producción de bioetanol, concluyendo que el jugo del mismo produce un extracto concentrado para la obtención de biocombustible, que puede ser fermentado usando una levadura comercial sin necesidad de nutrientes adicionales.

Por otra parte, Guerrero & Muñoz (2018) evalúan la utilización de residuos agrícolas bananeros para la producción de biocombustibles de segunda generación; con base en el balance energético del bioetanol se demuestra la capacidad que tiene este para desplazar a los combustibles fósiles. A este respecto, Gómez (2016) enfatiza en que la eficiencia en la producción de biocombustibles no solo se debe al aumento de insumos sino también a los medios de producción y las tecnologías aplicadas.

#### 4 CONCLUSIONES

Contrario a los combustibles fósiles, la biomasa lignocelulósica es una fuente de energía renovable cuya utilización disminuye las emisiones de contaminantes atmosféricos, posee una compleja estructura compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina y otros compuestos, debido a la estructura que presenta se dificulta su degradación, por ende, para poder hacer uso de este recurso de manera eficiente se debe realizar el pretratamiento de la biomasa a utilizar, ya sea por métodos físicos, químicos, fisicoquímicos, biológicos o la combinación de ellos.

La generación de biocombustible a partir de biomasa lignocelulósica es vista como una alternativa a la demanda energética, el aprovechamiento de recursos y la reducción de gases de efecto invernadero; su producción va adquiriendo fuerza, sin embargo, requiere de la mejora de las tecnologías de pretratamiento y una producción más eficiente.

En los países del primer mundo, existen biorrefinerías capaces de transformar material lignocelulósico a biocombustibles, y actualmente hacen uso de los bioproductos obtenidos, inclusive se ha logrado eliminar los métodos convencionales para el tratamiento de residuos. Por el contrario, hasta la fecha de publicación de este trabajo, en Ecuador la producción de biocombustibles de segunda generación se encuentra aún en etapa de desarrollo, ya que mayoritariamente los biocombustibles producidos y utilizados en el país corresponden a biocombustibles de primera generación, no obstante, se espera en un futuro cercano poder aplicar estas tecnologías limpias con la finalidad de implantar sistemas sostenibles que no representen amenazas a la seguridad alimentaria.

## 5 DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

## 6 REFERENCIAS

- Apóstol Tom M. (2<sup>da</sup> edición). (2001). Aplicaciones del cálculo diferencial, Cálculo Volumen II *Cálculo de funciones de Varias Variables y Algebra Lineal, con aplicaciones a las Ecuaciones Diferenciales y Probabilidades*, 384-388. México, México: Editorial Reverte.
- Álvarez, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359, 63–89.
- Amiri, H., & Karimi, K. (2018). Pretreatment and hydrolysis of lignocellulosic wastes for butanol production: Challenges and perspectives. In *Bioresource Technology* (Vol. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.117>
- Arora, R., Sharma, N. K., Kumar, S., & Sani, R. K. (2019). Lignocellulosic Ethanol: Feedstocks and Bioprocessing. In *Bioethanol Production from Food Crops*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813766-6.00009-6>
- Azizan, A., Jusri, N. A. A., Azmi, I. S., Abd Rahman, M. F., Ibrahim, N., & Jalil, R. (2022). Emerging lignocellulosic ionic liquid biomass pretreatment criteria/strategy of optimization and recycling short review with infrared spectroscopy analytical know-how. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.548>
- Bach, H., Mäkitie, T., Hansen, T., & Steen, M. (2021). Blending new and old in sustainability transitions: Technological alignment between fossil fuels and biofuels in Norwegian coastal shipping. *Energy Research and Social Science*, 74(March). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101957>
- Baramée, S., Siriatcharanon, A., Kavitch, Ketbot, P., Teeravittanakit, T., Waeonukul, R., Pason, P., Tachaapaikoon, C., Ratanakhanokchai, K., & Phitsuwon, P. (2020). Biological pretreatment of rice straw with cellulase-free xylanolytic enzyme-producing *Bacillus firmus* K-1: Structural modification and biomass digestibility. *Renewable Energy*, 160, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.061>
- Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., & Kumar, S. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.047>
- Bilal, M., Wang, Z., Cui, J., Ferreira, L. F. R., Bharagava, R. N., & Iqbal, H. M. N. (2020). Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers – A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems. *Science of the Total Environment*, 722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137903>
- Brazil, O. A. V., Vilanova-Neta, J. L., Silva, N. O., Vieira, I. M. M., Lima, Á. S., Ruzene, D. S., Silva, D. P., & Figueiredo, R. T. (2019). Integral use of lignocellulosic residues from different sunflower accessions: Analysis of the production potential for biofuels. *Journal of Cleaner Production*, 221, 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.274>
- Cañadas-López, Á., Rade-Loor, D., Domínguez-Andrade, J. M., Vargas-Hernández, J. J., Molina-Hidrovo, C., Macías-Loor, C., & Wehenkel, C. (2017). Variation in seed production of *Jatropha curcas* L. accessions under tropical dry forest conditions in Ecuador. *New Forests*, 48(6), 785–799. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9597-1>
- Choi, J. H., Jang, S. K., Kim, J. H., Park, S. Y., Kim, J. C., Jeong, H., Kim, H. Y., & Choi, I. G. (2019). Simultaneous production of glucose, furfural, and ethanol organosolv lignin for total utilization of high recalcitrant biomass by organosolv pretreatment. *Renewable Energy*, 130, 952–960. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.052>
- Costa, F. F., Oliveira, D. T. de, Brito, Y. P., Rocha Filho, G. N. da, Alvarado, C. G., Balu, A. M., Luque, R., & Nascimento, L. A. S. do. (2020). Lignocellulosics to biofuels: An overview of recent and relevant advances. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24, 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.001>

- Ge, X., Chang, C., Zhang, L., Cui, S., Luo, X., Hu, S., Qin, Y., & Li, Y. (2018). Conversion of Lignocellulosic Biomass Into Platform Chemicals for Biobased Polyurethane Application. In *Advances in Bioenergy* (1st ed., Vol. 3). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2018.03.002>
- Gill, M. K., Kocher, G. S., & Panesar, A. S. (2021). Optimization of acid-mediated delignification of corn stover, an agriculture residue carbohydrate polymer for improved ethanol production. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2(August 2020), 100029. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100029>
- Gómez, J. M. (2016). Analysis of the variation in the efficiency in the production of biofuels in Latin America. *Estudios Gerenciales*, 32(139), 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.01.001>
- Groves, C., Sankar, M., & Thomas, P. J. (2018). Second-generation biofuels: exploring imaginaries via deliberative workshops with farmers. *Journal of Responsible Innovation*, 5(2), 149–169. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1422926>
- Guerrero, A. B., & Muñoz, E. (2018). Life cycle assessment of second generation ethanol derived from banana agricultural waste: Environmental impacts and energy balance. *Journal of Cleaner Production*, 174, 710–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.298>
- Gundupalli, M. P., Anne Sahithi, S. T., Jayex, E. P., Asavasanti, S., Yasurin, P., Cheng, Y. S., & Sriariyanun, M. (2022). Combined effect of hot water and deep eutectic solvent (DES) pretreatment on a lignocellulosic biomass mixture for improved saccharification efficiency. *Bioresource Technology Reports*, 17(February), 100986. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100986>
- Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G. H., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>
- Haldar, D., & Purkait, M. K. (2021). A review on the environment-friendly emerging techniques for pretreatment of lignocellulosic biomass: Mechanistic insight and advancements. *Chemosphere*, 264, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128523>
- Hilbert, J. A., & Caratori, L. (2021). El potencial de los biocombustibles argentinos para contribuir al cumplimiento de las contribuciones de Argentina en el marco del Acuerdo de París. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de La Nación, July.
- Hoang, A. T., Nizetić, S., Ong, H. C., Mofijur, M., Ahmed, S. F., Ashok, B., Bui, V. T. V., & Chau, M. Q. (2021). Insight into the recent advances of microwave pretreatment technologies for the conversion of lignocellulosic biomass into sustainable biofuel. *Chemosphere*, 281(May), 130878. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130878>
- Huang, C., Lin, W., Lai, C., Li, X., Jin, Y., & Yong, Q. (2019). Coupling the post-extraction process to remove residual lignin and alter the recalcitrant structures for improving the enzymatic digestibility of acid-pretreated bamboo residues. *Bioresource Technology*, 285(March), 121355. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121355>
- Islam, M. K., Wang, H., Rehman, S., Dong, C., Hsu, H. Y., Lin, C. S. K., & Leu, S. Y. (2020). Sustainability metrics of pretreatment processes in a waste derived lignocellulosic biomass biorefinery. *Bioresource Technology*, 298, 122558. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122558>
- Jin, K., Liu, X., Jiang, Z., Tian, G., Yang, S., Shang, L., & Ma, J. (2019). Delignification kinetics and selectivity in poplar cell wall with acidified sodium chlorite. *Industrial Crops and Products*, 136(January), 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.067>
- Karimi, K. (2015). *Lignocellulose-Based Bioproducts* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14033-9>
- Karimi, K., & Taherzadeh, M. J. (2016). A critical review on analysis in pretreatment of lignocelluloses: Degree of polymerization, adsorption/desorption, and accessibility. *Bioresource Technology*, 203, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.035>
- Khan, M. U., Usman, M., Ashraf, M. A., Dutta, N., Luo, G., & Zhang, S. (2022). A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: Opportunities and Limitations. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10(November 2021), 100263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100263>
- Khuenkao, N., & Tippayawong, N. (2020). Production and characterization of bio-oil and biochar from ablative pyrolysis of lignocellulosic biomass residues. *Chemical Engineering Communications*, 207(2), 153–160. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1574769>
- Kikas, T., Tutt, M., Raud, M., Alaru, M., Lauk, R., & Olt, J. (2016). Basis of energy crop selection for biofuel production: Cellulose vs. lignin. *International Journal of Green Energy*, 13(1), 49–54. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909359>
- Kumar, A., & Chandra, R. (2020). Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. *Heliyon*, 6(2), e03170. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03170>
- Kumar, P. V., & Sulaiman, Z. (2016). Use of synthetic fusion gene to produce biodiesel from lignocellulosic biomass. *Biofuels*, 7(2), 191–200. <https://doi.org/10.1080/17597269.2015.1123984>
- Kumari, D., & Singh, R. (2018). Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(May 2017), 877–891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- Li, X., Shi, Y., Kong, W., Wei, J., Song, W., & Wang, S. (2022). Improving enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by bio-coordinated physicochemical pretreatment—A review. *Energy Reports*, 8, 696–709. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.015>
- Magalhães, A. I., de Carvalho, J. C., de Melo Pereira, G. V., Karp, S. G., Câmara, M. C., Medina, J. D. C., & Soccol, C. R. (2019). Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1505–1519. <https://doi.org/10.1002/bbb.2048>



- Mahmood, H., Moniruzzaman, M., Iqbal, T., & Khan, M. J. (2019). Recent advances in the pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and value-added products. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 20, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.08.001>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334(March), 125235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>
- Menon, V., & Rao, M. (2012). Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), 522–550. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.02.002>
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2016). *Energía Verde para Galápagos Inagotable, Limpia y Segura*. 22. [https://www.undp.org/content/dam/ecuador/docs/documentos/proyectos/ambiente/pnud\\_ec\\_REVISTA\\_ENERGIA\\_VERDE\\_PARA\\_GALAPAGOS-ilovepdf-compressed.pdf](https://www.undp.org/content/dam/ecuador/docs/documentos/proyectos/ambiente/pnud_ec_REVISTA_ENERGIA_VERDE_PARA_GALAPAGOS-ilovepdf-compressed.pdf)
- Mulakhudair, A. R., Hanotu, J., & Zimmerman, W. (2017). Exploiting ozonolysis-microbe synergy for biomass processing: Application in lignocellulosic biomass pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 105, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.018>
- Muñoz Mayorga, M., Herrera Orozco, I., Lechón Pérez, Y., Caldés Gomez, N., & Iglesias Martínez, E. (2018). Environmental Assessment of Electricity Based on Straight Jatropha Oil on Floreana Island, Ecuador. *Bioenergy Research*, 11(1), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9883-y>
- Mussatto, S. I., Yamakawa, C. K., van der Maas, L., & Dragone, G. (2021). New trends in bioprocesses for lignocellulosic biomass and CO<sub>2</sub> utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152(June), 111620. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111620>
- Muthukumarappan, K., & Swamy, G. J. (2020). Bioconversions in extrusion cooking. In *Extrusion Cooking*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815360-4.00014-6>
- Naciones Unidas. (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. Naciones Unidas, 1(1), 1–88. <https://undocs.org/es/A/70/1>
- Narváez C., R. A., Ramírez, V., Chulde, D., Espinoza, S., & López-Villada, J. (2015). Microwave Pyrolysis Process Potential of Waste Jatropha Curcas Seed Cake. *Renewable Energy in the Service of Mankind*, 1, 91–100. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17777-9>
- Ortiz-Ulloa, J. A., Abril-González, M. F., Pelaez-Samaniego, M. R., & Zalamea-Piedra, T. S. (2021). Biomass yield and carbon abatement potential of banana crops (*Musa spp.*) in Ecuador. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18741–18753. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09755-4>
- Parisi, C. (2018). Biorefineries distribution in the EU. Publications Office of the European Union, JRC113216, 1–8. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC113216>
- Pazmiño-Hernandez, M., Moreira, C. M., & Pullammanappallil, P. (2019). Feasibility assessment of waste banana peduncle as feedstock for biofuel production. *Biofuels*, 10(4), 473–484. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1323321>
- Pérez-Arévalo, J. J., & Velázquez-Martí, B. (2018). Evaluation of pruning residues of *Ficus benjamina* as a primary biofuel material. *Biomass and Bioenergy*, 108(November 2017), 217–223. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.11.017>
- Presidencia del Ecuador. (2012). Decreto Ejecutivo No1303. 1831.
- Qian, E. W. (2013). Pretreatment and Saccharification of Lignocellulosic Biomass. In *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404609-2.00007-6>
- Randhawa, K. S., Relph, L. E., Armstrong, M. C., & Rahman, P. K. S. M. (2017). Biofuel production: tapping into microalgae despite challenges. *Biofuels*, 8(2), 261–271. <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1224290>
- Rapado, P., Faba, L., & Ordóñez, S. (2021). Influence of delignification and reaction conditions in the aqueous phase transformation of lignocellulosic biomass to platform molecules. *Bioresource Technology*, 321(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124500>
- Raud, M., Kikas, T., Sippula, O., & Shurpali, N. J. (2019). Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111(May), 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.020>
- Rey-Porras, K. D., Leguizamón-Nonsoque, G. M., González-LaRotta, E. C., & Becerra-Fernández, M. (2021). Análisis de brechas del sector de biocombustibles en Colombia. *Inventum*, 16(30), 61–90. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.61-90>
- Rojas-Sossa, J. P., Zhong, Y., Valenti, F., Blackhurst, J., Marsh, T., Kirk, D., Fang, D., Dale, B., & Liao, W. (2019). Effects of ammonia fiber expansion (AFEX) treated corn stover on anaerobic microbes and corresponding digestion performance. *Biomass and Bioenergy*, 127(June), 105263. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105263>
- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 16(100), 75–82.
- Santana, G. C. de S. (2021). The goals of the National Biodiesel Program: between planning and implementation. *Ambiente & Sociedade*, 24. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200088r2vu202115ao>
- Sarker, T. R., Pattnaik, F., Nanda, S., Dalai, A. K., Meda, V., & Naik, S. (2021). Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*, 284(June), 131372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>
- SENECYT. (2014). Ecuador presenta su primera biorrefinería con el cambio de la matriz energética y productiva en la mira. <https://www.educacionsuperior.gob.ec/ecuador-presenta-su-primera-biorrefineria-con-el-cambio-de-la-matriz-energetica-y-productiva-en-la-mira/#:~:text=Se trata del Proyecto RESETA,más representativos a escala nacional.>

- Sharma, S., Kundu, A., Basu, S., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2020). Sustainable environmental management and related biofuel technologies. *Journal of Environmental Management*, 273(July), 111096. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111096>
- Soltanian, S., Aghbashlo, M., Almasi, F., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nizami, A. S., Ok, Y. S., Lam, S. S., & Tabatabaei, M. (2020). A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels. *Energy Conversion and Management*, 212(February), 112792. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112792>
- Srivastava, N., Mishra, K., Srivastava, M., Srivastava, K. R., Gupta, V. K., Ramteke, P. W., & Mishra, P. K. (2019). Role of compositional analysis of lignocellulosic biomass for efficient biofuel production. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: From Cellulose to Cellulase: Strategies to Improve Biofuel Production*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64223-3.00003-5>
- Susheel, K. (2018). Lignocellulosic Composite Materials. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7_6)
- Takada, M., Chandra, R., Wu, J., & Saddler, J. N. (2020). The influence of lignin on the effectiveness of using a chemithermomechanical pulping based process to pretreat softwood chips and pellets prior to enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology*, 302(January), 122895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122895>
- Toogood, H. S., & Scrutton, N. S. (2018). Retooling microorganisms for the fermentative production of alcohols. *Current Opinion in Biotechnology*, 50, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.08.010>
- Vasaki, M., Sithan, M., Ravindran, G., Paramasivan, B., Ekambaram, G., & Karri, R. R. (2022). Biodiesel production from lignocellulosic biomass using *Yarrowia lipolytica*. *Energy Conversion and Management*: X, 13(August 2021), 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100167>
- Vega-Quezada, C., Blanco, M., & Romero, H. (2017). Synergies between agriculture and bioenergy in Latin American countries: A circular economy strategy for bioenergy production in Ecuador. *New Biotechnology*, 39, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.06.730>
- Velazquez-Martí, B., Pérez-Pacheco, S., Gaibor-Chávez, J., & Wilcaso, P. (2016). Modeling of Production and Quality of Bioethanol Obtained from Sugarcane Fermentation Using Direct Dissolved Sugars Measurements. *Energies*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/en9050319>
- Wu, F., Zhao, S., Yu, B., Chen, Y. M., Wang, W., Song, Z. G., Hu, Y., Tao, Z. W., Tian, J. H., Pei, Y. Y., Yuan, M. L., Zhang, Y. L., Dai, F. H., Liu, Y., Wang, Q. M., Zheng, J. J., Xu, L., Holmes, E. C., & Zhang, Y. Z. (2020). A new coronavirus associated with human respiratory disease in China. *Nature*, 579(7798), 265–269. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2008-3>
- Xu, H., Peng, J., Kong, Y., Liu, Y., Su, Z., Li, B., Song, X., Liu, S., & Tian, W. (2020). Key process parameters for deep eutectic solvents pretreatment of lignocellulosic biomass materials: A review. *Bioresource Technology*, 310(March), 123416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123416>
- Xu, N., Liu, S., Xin, F., Zhou, J., Jia, H., Xu, J., Jiang, M., & Dong, W. (2019). Biomethane production from lignocellulose: Biomass recalcitrance and its impacts on anaerobic digestion. In *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 7, Issue AUG). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00191>
- Yao, Y. (2016). Leading pretreatments for enhancing the degradability of lignocellulosic wastes and the final products. *Environmental Technology Reviews*, 5(1), 103–111. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1253791>
- Yiin, C. L., Yap, K. L., Ku, A. Z. E., Chin, B. L. F., Lock, S. S. M., Cheah, K. W., Loy, A. C. M., & Chan, Y. H. (2021). Recent advances in green solvents for lignocellulosic biomass pretreatment: Potential of choline chloride (ChCl) based solvents. *Bioresource Technology*, 333(March), 125195. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125195>
- Yoon, L. W., Rafi, I. S., & Ngoh, G. C. (2022). Feasibility of eliminating washing step in bioethanol production using deep eutectic solvent pretreated lignocellulosic substrate. *Chemical Engineering Research and Design*, 179, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.01.031>
- Yousuf, A., Pirozzi, D., & Sannino, F. (2019). Fundamentals of lignocellulosic biomass. In *Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels*. INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00001-0>
- Yu, I. K. M., Chen, H., Abeln, F., Auta, H., Fan, J., Budarin, V. L., Clark, J. H., Parsons, S., Chuck, C. J., Zhang, S., Luo, G., & Tsang, D. C. W. (2020). Chemicals from lignocellulosic biomass: A critical comparison between biochemical, microwave and thermochemical conversion methods. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 0(0), 1–54. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1753632>

#### Contribución de autores

Autor	Contribución
Binnie Luzardo Gorozabel	Análisis de los datos, búsqueda bibliográfica, redacción del artículo.
Enrique Ruíz Reyes	Revisión
Jean Carlos Pérez Parra	Revisión