

Artículo de Revisión

PRETRATAMIENTO DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS: BREVE REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS UTILIZADOS

PRETREATMENT OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: A BRIEF REVIEW OF THE PRINCIPAL METHODS APPLIED

Ana María Espinosa Negrín ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8392-162X>
Lisbet Mailín López González ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>
Neibys Lourdes Casdelo Gutiérrez ² <https://orcid.org/0000-0001-6007-1722>

¹ Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez" (UNISS). Avenida de los Mártires 360, CP 60100, Sancti Spiritus, Cuba.

² Departamento de Licenciatura en Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Noviembre 23, 2020; Revisado: Diciembre 7, 2020; Aceptado: Enero 20, 2021

RESUMEN

Introducción:

El crecimiento de la demanda energética a nivel global resulta en numerosos desafíos medio ambientales y en el déficit energético. En este contexto la utilización de biomasa constituye una vía prometedora para la producción de energía vía digestión anaerobia, con la inclusión de una etapa de pretratamiento.

Objetivo:

Presentar una revisión sobre los principales métodos de pretratamiento reportados para mejorar la producción de biogás a partir de materiales lignocelulósicos, así como un acercamiento a métodos basados en solventes limpios.

Materiales y Métodos:

Se utilizaron como medios para la revisión tesis de doctorado y artículos de investigación donde se emplean técnicas de pretratamiento, así como revisiones publicadas anteriormente sobre el tema.

Resultados y Discusión:

Se describen los resultados reportados por diferentes autores en el uso de pretratamientos, considerándose como aspectos fundamentales la variación en la estructura y del rendimiento de metano, que puede ser muy diferente de una biomasa a otra al emplear condiciones similares. La formación de compuestos inhibitorios es más



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Ana M. Espinosa, Email: amespinosa@uniss.edu.cu



probable cuando se emplean los pretratamientos con explosión de vapor y ácidos, o al trabajar en condiciones severas de temperatura y tiempo. Métodos basados en solventes limpios incrementan la eliminación de lignina por lo que son prometedores para la producción de biogás.

Conclusiones:

La inclusión de una etapa de pretratamiento previa a un proceso de digestión anaerobia permite obtener mejores rendimientos de metano, siempre que se haga una buena selección de los parámetros del proceso.

Palabras clave: biogás; digestión anaerobia; pretratamiento.

ABSTRACT

Introduction:

The growth of global energy demand results in numerous environmental challenges and an energy deficit. In this context the biomass use is a promising way to produce sustainable energy through anaerobic digestion with pretreatment stage included.

Objective:

To present a summary of the main pretreatment methods reported to improve biogas production from lignocellulosic materials, as well as an approach on clean solvent-based methods.

Materials and Methods:

The main used sources were doctoral thesis and research articles where pre-treatment techniques were used, as well as published previously reviews about this topic.

Results and Discussion:

The results reported by different authors in the use of pre-treatments are described, considering as fundamental aspects the variation in the structure and methane yield, which can be different between dissimilar biomass using similar conditions. The formation of inhibitory compounds is more likely when steam explosion and acid pre-treatments are used, or when it is working under severe temperature and time conditions. Clean solvent-based methods increase lignin removal and are therefore promising for biogas production.

Conclusions:

The inclusion of a pre-treatment stage prior to anaerobic digestion process allows to obtain better methane yields, if a good process selection parameters is made.

Keywords: biogas; anaerobic digestion; pretreatment.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial unido al de la industrialización está provocando el crecimiento de la demanda energética a nivel global, lo cual resulta en numerosos desafíos como la contaminación ambiental, el agotamiento de los combustibles fósiles y el déficit del suministro energético (Rastegari y col., 2019). En este contexto la producción de bioenergía (biogás, bioetanol, biohidrógeno, etc) es considerada una alternativa más limpia, para lo cual se utilizan como materias primas fundamentales las

excretas de animales, residuos agrícolas y forestales, lodos de aguas residuales, residuos sólidos urbanos o líquidos, y de la industria alimentaria (Abraham y col., 2020). Dentro de estas, las de tipo lignocelulósico constituyen una buena oportunidad para la obtención de energía renovable vía digestión anaerobia (DA), dado por su abundancia, sostenibilidad y bajo costo (Lugani y col., 2020).

La DA es llevada a cabo por un consorcio microbiano a través de cuatro procesos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Para la biomasa lignocelulósica la primera etapa constituye, por lo general, la que limita el proceso, debido a la naturaleza recalcitrante y compleja de las interacciones entre los tres polímeros que la componen: hemicelulosa, celulosa y lignina, por lo que se debe realizar un pretratamiento para incrementar la biodigestibilidad del material y su accesibilidad enzimática (Tahezadeh y Karimi, 2008). El objetivo del presente trabajo es presentar una revisión sobre los principales métodos de pretratamiento reportados para mejorar la producción de biogás a partir de materiales lignocelulósicos, así como un acercamiento a métodos basados en solventes limpios.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizó como medio de investigación la búsqueda documental a través de tesis de doctorado y artículos de investigación donde se emplean técnicas de pretratamiento a diferentes biomazas lignocelulósicas, así como revisiones publicadas anteriormente sobre el tema, lo que permitió realizar una síntesis sobre los principales métodos de pretratamiento reportados, teniendo en cuenta los cambios estructurales y el efecto en el rendimiento de metano para los procesos de digestión anaerobia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pretratamiento se realiza con el fin de romper la capa de lignina que protege la celulosa y la hemicelulosa, para que la biomasa sea más accesible a la digestión. También ayuda a disminuir la cristalinidad de la celulosa y a aumentar la porosidad. Algunas biomazas se degradan fácilmente, pero se forman ciertos inhibidores de la DA como el furfural, 5-hidroximetilfurfural y compuestos fenólicos; los primeros por descomposición de pentosas y hexosas, y los últimos por solubilización de la lignina (Karuppiah y Ebenezer, 2019). Existen varios tipos de pretratamiento de materiales lignocelulósicos: físicos (mecánico e irradiación), químicos (álcalis, ácidos, oxidantes y organosolventes), físico-químicos (extrusión, hidrotérmico y explosión de vapor) y biológicos (microorganismos y enzimáticos), y su eficiencia varía según la biomasa y tipo de pretratamiento (Tabla 1) (Abraham y col., 2020).

Tabla 1. Efecto del pretratamiento sobre la alteración estructural y composicional de la biomasa lignocelulósica (Adaptado de (Zheng y col., 2014))

<i>Pre-tratamiento</i>	<i>Incrementa área superficial accesible</i>	<i>Decristaliza la celulosa</i>	<i>Solubiliza</i>		<i>Altera estructura de la lignina</i>	<i>Forma F/HMF</i>
			<i>HC</i>	<i>Lignina</i>		
Mecánico	●	●				
Irradiación	●	○	○			○
EV	●	●	●	○	●	●
Extrusión	●	●				
ACP	●	●	●	○	○	○
Ácido	●	●	●	●/○	●/○	●
Alcalino	●	●	○	●/○	●	○
Oxidativo	●	ND	●	●/○	●	○
Osol	●	○				
MB	●	ND	●	●	●	
Enzimático	●	○	○	●	●	

●= Mayor efecto, ○=Menor efecto, ND=no determinado, y blanco=no efecto.

EV: Explosión al vapor; ACP: Agua caliente presurizada; Osol: solvente orgánico; MB: microbiológico; F: Furfural; HMF: 5-hidroximetilfurfural; HC: hemicelulosa.

3.1 Pretratamiento físico

En el pretratamiento físico el tamaño de las partículas se reduce, lo cual conduce a un aumento en el área superficial y tamaño de poro, y a una disminución en la cristalinidad y grado de polimerización de la celulosa. Pueden ser mecánicos o por irradiación (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de pretratamientos físicos en la variación del rendimiento de metano de diferentes biomásas lignocelulósicas

<i>Pre-tratamiento</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Sustrato</i>	<i>Variación en el rendimiento de metano</i>	<i>Referencia</i>
Molido	Mecánicas	Girasol mexicano	+22 %	Dahunsi (2019)
	Placas de malla gruesa	Hierba	+25 %	(Tsapekos y col., 2015)
Irradiación	Microondas	Paja de trigo, avena, cebada	No hubo incremento neto	Sapci (2013)
	Microondas y NaOH	Paja de arroz	+55 %	(Kaur y Phutela, 2016)

Dentro de los mecánicos el más utilizado es la molienda mediante cuchillos, lijas, etc., con el cual pueden obtenerse aumentos en el rendimiento de metano respecto a la biomasa sin pretratar de 10-60 %, aunque reducciones excesivas del tamaño de las

partículas pueden decrecer la producción de biogás (Zheng y col., 2014). En el caso de la irradiación por microondas la energía es directamente entregada a la biomasa, esta se calienta rápidamente, se producen desviaciones en la orientación de los dipolos de compuestos polares y se incrementa la solubilidad (Pellera y Gidaracos, 2017).

3.2 Pretratamientos químicos

Los pretratamientos químicos tienen como función primaria remover la hemicelulosa y la lignina presentes en la biomasa, y su modo de acción depende del agente químico (ácido, álcalis, oxidativo y orgánico) y las condiciones de operación.

El pretratamiento ácido causa la interrupción de las fuerzas de Van der Waals, los enlaces de hidrógeno y los enlaces covalentes que mantienen unidos los componentes de la biomasa, provocando la lisis celular y la liberación de los compuestos orgánicos intracelulares. El más utilizado con este fin es el ácido sulfúrico (H_2SO_4), pero también se ha reportado el uso de ácido acético, nítrico y clorhídrico (Hendriks y Zeeman, 2009), (Zheng y col., 2014). Se han observado incrementos en el rendimiento de metano para pretratamientos con H_2SO_4 superiores al 100 % (Sarto y col., 2019), (Song y col., 2014), aunque pueden ser mucho menores si las condiciones (por ejemplo: temperatura, tiempo, pH) propician la formación de inhibidores (Abraham y col., 2020).

El mecanismo del pretratamiento alcalino induce principalmente la hinchazón de las partículas orgánicas por acción de los aniones hidroxilo (OH^-) causando deslignificación y ruptura de los enlaces éster intermoleculares. Pueden emplearse soluciones de hidróxido de sodio ($NaOH$), calcio ($Ca(OH)_2$), potasio (KOH) y amoníaco (Karuppiyah y Ebenezer, 2019). El $NaOH$ es uno de los más efectivos pues se alcanza una elevada hidrólisis enzimática de la celulosa respecto a otros álcalis (Rodrigues y col., 2016).

En cachaza se ha reportado el uso de $NaOH$ y $Ca(OH)_2$, observándose incrementos en el rendimiento de metano respecto al material sin pretratar al trabajar con cargas de álcalis de 1,5-9,5 a temperaturas de 45-121°C y tiempos entre 20 y 60 min (Tabla 3). Con el $NaOH$ es posible utilizar tiempos y temperaturas inferiores a cuando se usa $Ca(OH)_2$ debido a su mayor poder cáustico. El efecto del pretratamiento con $NaOH$ resulta en una mayor solubilización que con $Ca(OH)_2$ para severidades comparables (Zheng y col., 2014); sin embargo, su precio y el contenido de Na^+ a la salida de una planta de biogás pudiera afectar su calidad como bioabono, lo que hace recomendable el uso de $Ca(OH)_2$. Además, el $Ca(OH)_2$ puede ser recuperado como carbonato de calcio ($CaCO_3$) por inyección de CO_2 en la solución. Una mezcla de ambos álcalis tiene varias ventajas: mayor solubilización, incremento del rendimiento de metano, menor costo y un efluente con la calidad adecuada para el suelo.

El pretratamiento oxidativo promueve la ruptura de núcleos aromáticos, sustitución electrofílica, dislocación de cadenas laterales y apertura de enlaces éter alquil-arílicos. En este, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se convierte en radicales hidroxilo (OH^\cdot) que actúan sobre la biomasa, pero el mecanismo es menos selectivo por lo que porciones de hemicelulosa y celulosa se pierden durante el proceso. Los aumentos en el rendimiento de metano oscilan entre 30-90 % (Tabla 3). También puede utilizarse la oxidación de Fenton, ozono y ozono combinado con H_2O_2 y Fe^{2+} (Abraham y col., 2020).

Tabla 3. Efecto de pretratamientos químicos en la variación del rendimiento de metano de diferentes biomásas lignocelulósicas

<i>Pre-tratamiento</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Sustrato</i>	<i>Variación en el rendimiento de metano</i>	<i>Referencia</i>
Ácido	H ₂ SO ₄ (5 %), 121°C, 60 min	Jacinto de agua	+131 %	(Sarto y col., 2019)
	H ₂ SO ₄ , HCl, CH ₃ COOH y H ₂ O ₂ (1; 2; 3 y 4 %), 25 °C, 7 días	Rastrojo de maíz	+115 (3 % H ₂ O ₂)	(Song y col., 2014)
Alcalino	Ca(OH) ₂ , 100°C, 60 min CA: 9,5 g/100 g _{st}	Cachaza	+32 %	López (2016)
	NaOH, 45°C, 30 min CA: 1,5; 3 y 6 g/100 g _{mf}	Cachaza	+12 % (CA=1,5) +38 % (CA=3) +40 % (CA=6)	(Janke y col., 2016)
	NaOH, 121°C, 30 min CA: 6 g/100 g _{mf}	Cachaza	+8 %	(Janke y col., 2019)
Oxidante	H ₂ O ₂ (2,68 %), 6–18 días	Paja de arroz	+88 %	(Song y col., 2013)
	H ₂ O ₂ (4 %), 55°C, 24 h	Tallo de girasol	+33 %	(Monlau y col., 2011)
Orgánico	Etanol (50 %), 180°C, 1 h	Paja de trigo	+15 %	(Mancini y col., 2018)

CA: carga de álcalis (g álcalis/100 g biomasa); mf: masa fresca; st: sólidos totales.

Los solventes orgánicos son utilizados para separar celulosa de alta pureza de la biomasa lignocelulósica sin causar su degradación significativa. Se ha reportado el uso de varios solventes como alcoholes, ésteres, cetonas, ácidos, fenoles y éteres a temperaturas de 150-200°C, o a menores temperaturas si se utiliza un catalizador. El etanol es uno de los más utilizados, con valores reportados de incrementos en el rendimiento de metano del 15 al 270 %, aunque debe ser removido antes de la DA ya que inhibe las enzimas hidrolíticas (Taherzadeh y Karimi, 2008), (Abraham y col., 2020).

3.3 Pretratamientos físico-químicos

El pretratamiento físico-químico es un enfoque combinado con el que se rompen los enlaces de hidrógeno e incrementa el área superficial a temperaturas entre 50-250°C. El tiempo es un factor decisivo pues si la exposición al calor es prolongada se forma mayor cantidad de inhibidores (Wilson y Novak, 2009). Se clasifican en: explosión de vapor (EV), extrusión y agua caliente presurizada (ACP).

La EV consiste en incubar la biomasa con vapor a altas presiones (5-50 bar) y temperaturas en el rango de 160-250°C, luego se libera la presión rápidamente, que es lo que provoca cambios en la estructura. Ha sido utilizada en bagazo por Mokomele y col., (2019), donde se obtuvo una remoción significativa de hemicelulosa y/o ruptura de

los grupos acetilo, enriquecimiento en el contenido de lignina e incremento en celulosa. En este caso el rendimiento de metano no fue mayor que el de la biomasa sin pretratar, a diferencia de otros sustratos donde se han logrado incrementos entre 47 y 118 % (Mulat y col., 2018), (Zhou y col., 2016).

En el caso de la extrusión se expone la biomasa a una serie de procesos como calentamiento, mezclado y caída rápida de presión, mientras el material es liberado del extrusor; esta caída rápida provoca la liberación del agua intracelular que resulta en una ruptura estructural que favorece la DA (Zheng y col., 2014). Se han encontrado incrementos en el rendimiento de metano de 1-70 % (Tabla 4), según la biomasa, las condiciones del pretratamiento y de digestión empleadas (Abraham y col., 2020).

El pretratamiento por ACP o hidrotérmico utiliza agua caliente a temperaturas entre 120-230°C bajo altas presiones. El agua penetra la biomasa y causa la hidrólisis de la hemicelulosa en oligosacáridos solubles. Esta reacción es catalizada por iones H^+ , formados primero por autoionización del agua, y luego por el ácido acético producido por la liberación de los grupos O-acetil (Garrote y col., 1999). Se han reportado incrementos en el rendimiento de biogás de 20-150 % para diferentes sustratos y condiciones de pretratamiento (Tabla 4), aunque a temperaturas muy altas se debe tener en cuenta la posible formación de compuestos indeseables (Abraham y col., 2020).

Tabla 4. Efecto de pretratamientos físico-químicos en la variación del rendimiento de metano de diferentes biomazas lignocelulósicas

<i>Pre-tratamiento</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Sustrato</i>	<i>Variación del rendimiento de metano</i>	<i>Referencia</i>
EV	210°C, 10 min	Madera de abedul	+118 %	(Mulat y col., 2018)
	200°C, 1 min	Paja de arroz	+45,66 %	(Zhou y col., 2016)
	200°C, 1,5 min 200°C, 2 min		+49,58 % +74,8 %	
Extrusión	Extrusor de un solo tornillo	Ensilado de paja de maíz	+35 %	(Pilarski y col., 2016)
ACP	120-180°C, 30-50 min	Paja de cártamo	+70 %	(Hashemi y col., 2019)
	150°C, 20 min	Cachaza	+63 %	(López y col., 2014)

EV: explosión de vapor; ACP: agua caliente presurizada.

3.4 Pretratamientos biológicos

Los pretratamientos biológicos pueden realizarse por acción de microorganismos (bacterias y hongos) o de enzimas, obteniéndose mejoras en el rendimiento de metano respecto a la biomasa sin pretratar desde 10 % a más del 100 % (Tabla 5). Estos constituyen procesos ecológicamente amigables con respecto a los físicos y químicos, debido al menor requerimiento energético, uso de condiciones leves y la no formación de compuestos tóxicos; sin embargo, pueden aparecer desventajas como la necesidad de amplias áreas estériles y el alto costo de las enzimas, entre otras (Brémond y col., 2018).

Tabla 5. Efecto de pretratamientos biológicos en la variación del rendimiento de metano de diferentes biomásas lignocelulósicas

<i>Pre-tratamiento</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Sustrato</i>	<i>Variación del rendimiento de metano</i>	<i>Referencia</i>
MO	Fluido del rumen	Paja de arroz	+83 %	(Zhang y col., 2016)
Enzimas	Celulasa	Rastrojo de maíz	+37 %	(Wang y col., 2018)

MO: microorganismos.

De los pretratamientos abordados se considera que los métodos ACP, EV, termoalcalino ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y oxidativo presentan un mayor potencial para producción de biogás por su menor consumo de agua, químicos, energía y su bajo costo económico y ambiental.

3.5 Pretratamientos basados en solventes más limpios

Los pretratamientos antes mencionados constituyen métodos tradicionales que presentan desventajas como la liberación de productos de degradación y falta de selectividad, en tanto, en los últimos años han tomado especial atención los pretratamientos basados en solventes más verdes que resultan tener menor costo, consumos de energía más bajos y que permiten la obtención de nuevos productos (Bhatia y col., 2020). Entre ellos se puede encontrar el uso de líquidos iónicos (LI), solventes eutécticos profundos (SEP) y fluidos supercríticos (FSc), que han sido utilizados en diferentes biomásas de tipo lignocelulósico (bagazo, paja de arroz, paja de trigo, bambú, entre otros).

Los LI son sales orgánicas que existen como líquidos a bajas temperaturas, a menudo menores que 100°C (Kuila y Sharma, 2017). Los más comunes se derivan del imidazol, la piridina y amoníaco (Roy y col., 2020). Estos actúan selectivamente removiendo la lignina y parte de la hemicelulosa de la biomasa para proveer la celulosa pura para hidrólisis posteriores (Bhatia y col., 2020). La mayoría de los LI pueden recuperarse y ser reutilizados y no tienen propiedades inflamables, pero resultan caros y tóxicos a los microorganismos y enzimas hidrolíticas. Este pretratamiento ha sido combinado con el pretratamiento ácido en procesos de sacarificación enzimática obteniéndose rendimientos de glucosa del 95,5 % (Rahmati y col., 2020).

Los SEP son considerados por muchos autores como un tipo de LI, pero derivados de fuentes naturales no tóxicas, son baratos y fáciles de formular. Los más empleados constan de al menos dos partes: un aceptor de enlace de hidrógeno (ejemplo: cloruro de colina) y un donador (ejemplo: ácido láctico). Este pretratamiento fragmenta la biomasa en sus componentes mayoritarios y facilita su degradación para producir una gran variedad de químicos de valor agregado (Roy y col., 2020).

Los fluidos supercríticos son sustancias como el agua y el dióxido de carbono (CO_2) que a temperaturas y presiones superiores al punto crítico exhiben propiedades de líquidos. El más utilizado en las biomásas lignocelulósicas es el CO_2 debido a que no es tóxico ni inflamable, presenta condiciones críticas bajas y bajo costo, además de ser volátil (Roy y col., 2020). El CO_2 supercrítico difunde a través de la estructura cristalina de la celulosa, altera el enlace entre la celulosa y la hemicelulosa, y la explosión creada rompe la pared celular de la biomasa y facilita el acceso de las enzimas (Kuila y

Sharma, 2017), pero no es capaz de solubilizar ni alterar la estructura de la lignina (Rahmati y col., 2020). Se han observado mejoras al combinarse con pretratamientos de humedad y de ultrasonido (Roy y col., 2020).

La alta eliminación de lignina previo al proceso de DA es una ventaja crucial para los pretratamientos basados en solventes más limpios mencionados. Sin embargo, los altos costos de los solventes, su síntesis a gran escala, reciclado, toxicidad a la DA, eficiente separación de los productos obtenidos, son aspectos que están siendo estudiados para su disponibilidad comercialmente. En este sentido el SEP ofrece ventajas sobre los otros, por lo que es considerada una técnica prometedora para el futuro.

4. CONCLUSIONES

1. La inclusión de una etapa de pretratamiento previa a un proceso de DA en biomásas lignocelulósicas resulta de gran utilidad para mejorar el rendimiento de metano.
2. Cada método de pretratamiento utiliza diferentes mecanismos por los cuales modifica la estructura de la biomasa.
3. La selección de los parámetros durante el pretratamiento resulta muy importante pues su efecto en la estructura varía para cada material, donde juega un papel significativo la producción de compuestos tóxicos que pueden inhibir la DA y por tanto, provocar una disminución en el rendimiento de metano.

REFERENCIAS

- Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H., & Sang, B.-I., Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass., *Bioresource Technology*, Vol. 301, 2020, pp. 1-13.
- Bhatia, S.K., Jagtap, S.S., Bedekar, A.A., Bhatia, R.K., Patel, A.K., Pant, D., Banu, J.R., Rao, C.V., Kim, Y.-G., & Yang, Y.-H., Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: effect of key parameters, technological improvements, and challenges., *Bioresource Technology*, Vol. 300, 2020, pp. 1-13.
- Brémond, U., de Buyer, R., Steyer, J.-P., Bernet, N., & Carrere, H., Biological pretreatments of biomass for improving biogas production: an overview from lab scale to full-scale., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, 2018, pp. 583-604.
- Dahunsi, S., Mechanical pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: Methane yield prediction from biomass structural components., *Bioresource technology*, Vol. 280, 2019, pp. 18-26.
- Garrote, G., Dominguez, H., & Parajo, J., Hydrothermal processing of lignocellulosic materials., *Holz als Roh-und Werkstoff*, Vol. 57, 1999, pp. 191-202.
- Hashemi, S.S., Karimi, K., & Mirmohamadsadeghi, S., Hydrothermal pretreatment of safflower straw to enhance biogas production., *Energy*, Vol. 172, , 2019, pp. 545-554.
- Hendriks, A., & Zeeman, G., Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass., *Bioresource Technology*, Vol. 100, 2009, pp. 10-18.
- Janke, L., Leite, A., Batista, K., Weinrich, S., Sträuber, H., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W., Optimization of hydrolysis and volatile fatty acids production from

- sugarcane filter cake: Effects of urea supplementation and sodium hydroxide pretreatment., *Bioresource Technology*, Vol. 199, 2016, pp. 235-244.
- Janke, L., Weinrich, S., Leite, A. F., Sträuber, H., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W., Pre-treatment of filter cake for anaerobic digestion in sugarcane biorefineries: Assessment of batch versus semi-continuous experiments., *Renewable Energy*, Vol. 143, 2019, pp. 1416-1426.
- Karuppiah, T., & Ebenezer, V., *Anaerobic Digestion*, Vol. 1, Editorial Bioresource Engineering, Londres, 2019, pp. 84-107.
- Kaur, K., & Phutela, U.G., Enhancement of paddy straw digestibility and biogas production by sodium hydroxide-microwave pretreatment., *Renewable Energy*, Vol. 92, 2016, pp. 178-184.
- Kuila, A., & Sharma, V., *Lignocellulosic biomass production and industrial applications*, Vol. 1, Editorial Scrivener, Estados Unidos, 2017, pp 120-121.
- López, L.M., *Análisis de alternativas de Producción Más Limpias (PML) para la producción de biogás con fines energéticos en una empresa azucarera diversificada.*, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2016.
- López, L.M., Pereda, I., Dewulf, J., Budde, J., Heiermann, M. & Vervaeren, H., Effect of liquid hot water pre-treatment on sugarcane press mud methane yield., *Bioresource Technology*, Vol. 169, 2014, pp. 284-290.
- Lugani, Y., Sooch, B.S., & Kumar, S., *Biofuel and Biorefineries Technology*, Vol. 10, Editorial Scrivener, Estados Unidos, 2020, pp. 51-87.
- Mancini, G., Papirio, S., Lens, P.N., & Esposito, G., Increased biogas production from wheat straw by chemical pretreatments., *Renewable energy*, Vol. 119, 2018, pp. 608-614.
- Mokomele, T., da Costa Sousa, L., Balan, V., van Rensburg, E., Dale, B.E., & Görgens, J.F., Incorporating anaerobic co-digestion of steam exploded or ammonia fiber expansion pretreated sugarcane residues with manure into a sugarcane-based bioenergy-livestock nexus., *Bioresource technology*, Vol. 272, 2019, pp. 326-336.
- Monlau, F., Barakat, A., Latrille, E., Steyer, J.-P., & Carrère, H., Impact of various thermo chemical pretreatments on solubilisation and methane production of sunflower stalks., *ADSW&EC-International IWA-Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops*, Viena, Austria, 2011.
- Mulat, D.G., Huerta, S.G., Kalyani, D. & Horn, S.J., Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment and bioaugmentation with cellulolytic bacterium *Caldicellulosiruptor bescii*., *Biotechnology for biofuels*, Vol. 11, 2018, pp. 1-15.
- Pellera, F.-M., & Gidarakos, E., Microwave pretreatment of lignocellulosic agroindustrial waste for methane production., *Journal of environmental chemical engineering*, Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 352-365.
- Pilarski, K., Pilarska, A.A., Witaszek, K., Dworecki, Z., Żelaziński, T., Ekielski, A., Makowska, A., & Michniewicz, J., The impact of extrusion on the biogas and biomethane yield of plant substrates., *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 17, No. 4, 2016, pp. 264-272.

- Rahmati, S., Doherty, W., Dubal, D., Atanda, L., Moghaddam, L., Sonar, P., Hessel, V., & Ostrikov, K.K., Pretreatment and fermentation of lignocellulosic biomass: reaction mechanisms and process engineering., *Reaction Chemistry & Engineering*, Vol. 5, No. 11, 2020, pp. 2017-2047.
- Rastegari, A.A., Yadav, A.N., & Gupta, A., Prospects of renewable bioprocessing in future energy systems., Vol. 10, Springer, 2019, pp. 1-51.
- Rodrigues, C.I.S., Jackson, J.J., & Montross, M.D., A molar basis comparison of calcium hydroxide, sodium hydroxide, and potassium hydroxide on the pretreatment of switchgrass and miscanthus under high solids conditions., *Industrial Crops and Products*, Vol. 92, 2016, pp. 165-173.
- Roy, R., Rahman, M.S., & Raynie, D.E., Recent Advances of Greener Pretreatment Technologies of Lignocellulose., *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 3, 2020, pp. 1-17.
- Sapci, Z., The effect of microwave pretreatment on biogas production from agricultural straws., *Bioresource technology*, Vol. 128, 2013, pp. 487-494.
- Sarto, S., Hildayati, R., & Syaichurrozi, I., Effect of chemical pretreatment using sulfuric acid on biogas production from water hyacinth and kinetics., *Renewable Energy*, Vol. 132, 2019, pp. 335-350.
- Song, Z.-l., Yag, G.-h., Feng, Y.-z., Ren, G.-x., & Han, X.-h., Pretreatment of rice straw by hydrogen peroxide for enhanced methane yield., *Journal of Integrative Agriculture*, Vol. 12, No. 7, 2013, pp. 1258-1266.
- Song, Z., GaiheYang, X.L., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y., Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion., *PloS one*, Vol. 9, No. 4, 2014, pp. 1-8.
- Taherzadeh, M.J., & Karimi, K., Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review., *International journal of molecular sciences*, Vol. 9, No. 9, 2008, pp. 1621-1651.
- Tsapekos, P., Kougiyas, P., & Angelidaki, I., Biogas production from ensiled meadow grass; effect of mechanical pretreatments and rapid determination of substrate biodegradability via physicochemical methods., *Bioresource technology*, Vol. 182, 2015, pp. 329-335.
- Wang, S., Li, F., Wu, D., Zhang, P., Wang, H., Tao, X., Ye, J., & Nabi, M., Enzyme pretreatment enhancing biogas yield from corn stover: Feasibility, optimization, and mechanism analysis., *Journal of agricultural and food chemistry*, Vol. 66, No. 38, 2018, pp. 10026-10032.
- Wilson, C.A., & Novak, J.T., Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment., *Water research*, Vol. 43, No. 18, 2009, pp. 4489-4498.
- Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C., & Xu, G., Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure., *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 21, 2016, pp. 9153-9158.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y., Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production., *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 42, 2014, pp. 35-53.
- Zhou, J., Yan, B., Wang, Y., Yong, X., Yang, Z., Jia, H., Jiang, M., & Wei, P., Effect of

steam explosion pretreatment on the anaerobic digestion of rice straw., RSC advances, Vol. 6, No. 91, 2016, pp. 88417-88425.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Ana María Espinosa Negrín. Realizó revisión bibliográfica y la escritura del artículo.
- Dra.C. Lisbet Mailín López González. Colaboró con la revisión bibliográfica y participó en la corrección del artículo.
- Dra.C. Neibys Lourdes Casdelo Gutiérrez. Participó en la corrección del artículo.