

Vigilancia tecnológica asociada a los pretratamientos para la generación de biogás a partir de sustratos lignocelulósicos

Luis Felipe Ocampo Díaz¹, Andres Sebastián Ricardo Pineda¹, Paola Andrea Acevedo Pabón¹, Iván Cabeza Rojas¹

¹Facultad de Ingeniería Ambiental Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia
luisocampo@usantotomas.edu.co

Resumen

En la actualidad se generan grandes cantidades de biomasa lignocelulosa la cual es desechada, esta cuenta con un alto potencial para el uso en la producción de biogás y puede ser aprovechada para producir energía no convencional, este artículo presenta una Vigilancia Tecnológica dirigida al reconocimiento de las distintas tecnologías aplicadas a los diversos pretratamientos para la producción de biogás a partir de residuos lignocelulósicos, en primer lugar se realizó una recopilación de información a partir de ecuaciones de búsqueda en las bases de datos Scopus y Directory open access journals (DOAJ), posteriormente se complementó la investigación con datos suministrados por las patentes presentes en el motor de búsqueda Espacenet. Los datos más relevantes de la búsqueda fueron sintetizados en el programa VOSviewer y Excel arrojando como resultado que los países más avanzados en temas de investigación son China, Estados Unidos, Italia e India, dado su potencial agrícola y una dieta basada en la alta ingesta de cereales y granos, esto conlleva al desarrollo de tecnologías más eficientes en cuanto al aprovechamiento de la biomasa.

Palabras clave

Biogás, residuos lignocelulósicos, pretratamientos, vigilancia tecnológica, biomasa, residuos agroindustriales.

Abstract

At present, large amounts of lignocellulosic biomass are generated which is discarded, this has a high potential for use in the production of biogas and can be used to produce unconventional energy, this article presents a Technological Watch aimed at the recognition of the different technologies applied to the various pretreatments for the production of biogas from lignocellulosic waste, first a compilation of information was made from search equations in the Scopus and Directory open access journals (DOAJ) databases, then I complement the research with data supplied by the patents present in the Espacenet search engine. The most relevant data of the search were synthesized in the VOSviewer and Excel program, showing that the most advanced countries in research issues are China, the United States, Italy and India, given their agricultural potential and a diet based on the high intake of cereals and grains, this leads to the development of more efficient technologies in terms of the use of biomass.

KEY WORDS

biogas, lignocellulosic waste, pre-treatment, technology watch, biomass, agro-industrial waste

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables contribuyen a la disminución de los gases de efecto invernadero (GEI), disminuyen la dependencia energética especialmente en los países con bajos porcentajes de fuentes no renovables, permiten la generación de empleo y el desarrollo tecnológico, además del gran potencial energético y la capacidad de regenerarse por medios naturales no cabe duda que la implementación de energías renovables tiene múltiples beneficios, sin embargo la implementación en países subdesarrollados ha tenido gran dificultad, debido a su costo y la poca investigación tecnológica. Teniendo en cuenta la situación actual la siguiente investigación propone una Vigilancia Tecnológica (VT) en donde se extrae información relevante sobre tendencias tecnológicas, novedades, invenciones, potenciales socios o competidores y aplicaciones tecnológicas emergentes, a la vez que se contemplan aspectos regulatorios y de mercado que pueden condicionar el éxito de una innovación tecnológica. Toda esta información estructurada y analizada brinda la posibilidad de trazar planes y formular estrategias tecnológicas, minimizando la incertidumbre. No obstante, el actual entorno global caracterizado por acelerados cambios, la gran cantidad de información generada y puesta al alcance de todos (debido principalmente al desarrollo de las tecnologías de información y comunicación) y la importancia de la innovación dentro de la competitividad de las empresas, hacen necesario que este proceso de VT se sistematice y formalice.

El mayor problema asociado a los residuos lignocelulósicos es que no pueden fermentarse directamente, debido a que el material lignocelulósico se compone de tejidos vegetales cuyas células presentan una pared formada por micro fibrillas de celulosa, estas microfibrillas forman capas recubiertas de hemicelulosa sobre las que se deposita la lignina. Otros factores que dificultan la valorización de estos materiales son: la influencia negativa de los inhibidores y subproductos que se generan durante el pretratamiento, arquitectura fisicoquímica de las paredes celulares de estos materiales y el alcance de la ruptura de la pared celular para la generación de productos con valor agregado [2]. Para desarrollar este proceso de manera efectiva y obtener un beneficio es necesario llevar a cabo un pretratamiento, este tiene como objetivo principal la conversión de los complejos lignocelulósicos en sus componentes individuales (celulosa, hemicelulosa y lignina).

Teniendo en cuenta la situación actual, se puede observar que a pesar de que Colombia genera grandes cantidades de biomasa y cuenta con un alto potencial para el uso de esta misma en la producción de biogás como una alternativa a la energía convencional no es aprovechado. La generación de grandes cantidades de productos de valor agregado, con el fin de reducir el uso de los combustibles fósiles y los impactos desfavorables sobre el medio ambiente, las múltiples fuentes de residuos y efluentes orgánicos conjuntamente con las biomásas provenientes de cultivos energéticos celulósicos representan una oportunidad sustancial para los futuros sistemas energéticos. El objetivo del presente trabajo es desarrollar una vigilancia tecnológica dirigida al reconocimiento de las distintas tecnologías aplicadas a los diversos pretratamientos para la producción de biogás a partir de residuos lignocelulósicos, esto con el fin de mejorar su eficiencia y eficacia en la producción de biogás así como identificar posibles oportunidades de mejora y la posible implementación de dichas tecnologías a nivel nacional.

II. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta la norma **UNE 16600:2006** para vigilancia tecnológica se plantea una metodología con el fin de abordar todos los aspectos para desarrollar de manera eficiente nuestra investigación. En la **Figura 1** se puede observar los siete pasos a seguir para el desarrollo de la misma, iniciando con una identificación del tema y proponiendo los objetivos, seguido a esto se realiza una identificación del problema, posteriormente se realiza una búsqueda y organización de la información para así mismo realizar una depuración de la misma, seguido a esto se realiza un análisis de la información y se plantean posibles resultados y por último se realiza la validación de la información, se analizan los resultados para la preparación del informe final de vigilancia tecnológica. A continuación se realiza una descripción detallada de cada una de las etapas para la elaboración del informe final de Vigilancia Tecnológica.

Metodología de la vigilancia tecnológica

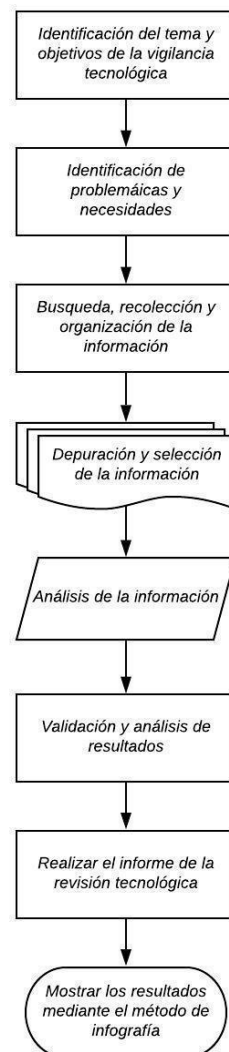


Figura 1. Descripción de la metodología por diagrama de bloques
Fuente: Autores

Identificación del tema y objetivos de la vigilancia tecnológica:

Para realizar la identificación del tema fue necesario realizar una revisión bibliográfica sobre la disposición y el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos, a su vez revisar las tendencias tecnológicas para el aprovechamiento del mismo. Una vez identificada la problemática sobre la falta de aprovechamiento, así como las posibilidades y los beneficios que pueden llegar a ser obtenidos, se procede a plantear los objetivos con el fin de realizar un aporte o una solución para dicha problemática.

Identificación de problemáticas y necesidades:

Para poder identificar las problemáticas y necesidades a nivel nacional e internacional es necesario saber cómo se encuentra el país con respecto a una temática determinada y realizar una comparación con los países que han sido pioneros en el desarrollo de dicha temática, en este caso las energías alternativas específicamente el biogás. Se realiza una revisión bibliográfica en bases de datos de tipo científico como Scopus y Directory open access journals, al igual que una revisión de las patentes registradas en Espacenet.

Búsqueda, recolección y organización de la información:

Para la elaboración de este documento se han utilizado las bases de datos existentes con información, publicaciones, patentes y proyectos a nivel nacional e internacional. Se revisaron los artículos publicados desde el año 2015 hasta el 2020. Se realizó una identificación de la temática en estudio mediante la investigación en plataformas como Directory open access journals y Scopus, las cuales son bases de datos de carácter multidisciplinar, estas plataformas cuentan con diversas opciones de búsqueda que permiten obtener resultados más acertados al generar ecuaciones de búsqueda específicas, como por ejemplo los autores, nombres de artículos, áreas de investigación y fechas de publicación. Posteriormente se realizó una búsqueda de patentes con el año de publicación y las instituciones solicitantes con el fin de conocer las tecnologías, los inventores, las empresas que las patentan y la manera como lo hacen. Para la organización de la información se realizó mediante tablas de Excel, en donde se clasificaron según la base de datos, el año de publicación, la cantidad de citaciones, el país de publicación y las tendencias por año.

Selección y Depuración de la información:

La información fue seleccionada teniendo en cuenta parámetros como el tiempo, el cual estuvo comprendido del año 2015 al 2020, el número de citaciones por documento y la cantidad de datos que proporciona, esto con el fin de tener la certeza de que la información además de ser relevante es clara, concisa y actualizada.

Análisis de la información:

Una vez ha sido seleccionada, la información es ingresada al software VOSviewer y Excel, las cuales son herramientas que permiten llevar a cabo un análisis bibliométrico mediante la creación de redes bibliométricas con el fin de presentar, visualizar y analizar la información de forma más clara, es importante realizar un análisis de la información ya que esto permite verificar la calidad de la misma. A la hora de realizar un análisis bibliométrico es necesario seleccionar criterios de búsqueda determinados para que las redes bibliográficas resultantes sean más confiables y concretas al analizarlas. Para la presente Vigilancia Tecnológica se realizaron gráficas en donde se reflejan la cantidad de publicaciones, documentos por año y documentos por afiliación con el fin de sintetizar la información relevante y reflejar los resultados en una descripción de los pretratamientos, la innovación en tecnologías y los beneficios de implementar un proceso alternativo para la producción de biogás.

Validación resultados:

A partir de las redes bibliométricas se determinó que los cinco pretratamientos más relevantes son: explosión a vapor, alcalino, por extrusión, químico y biológico, con base en lo anterior se realizó una descripción detallada de cada uno de los documentos que implementan estos pretratamientos con el fin de comparar los rendimientos de producción de biogás y los costos del proceso productivo para sugerir la mejor alternativa de aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica.

Informe de la Vigilancia tecnológica:

Una vez la información ha sido seleccionada, depurada, verificada y analizada se procede a realizar el informe final con todos los parámetros establecidos por la norma **UNE 16600:2006** para el desarrollo de una vigilancia tecnológica.

III. RESULTADOS

Para el desarrollo de esta investigación se generaron 4 ecuaciones de búsqueda, la ecuación de búsqueda número 1 lleva por nombre ***lignocellulosic biomass AND pre treatment AND biogas*** con un total de publicaciones 195 publicaciones para la base de datos Scopus y 31 publicaciones para la base de datos DOAJ, la segunda ecuación de búsqueda lleva por nombre ***lignocellulosic biomass***

AND pretreatment AND technology AND biogas con un total de 35 publicaciones para la base de datos Scopus y 29 publicaciones para la base de datos DOAJ, la tercera ecuación de búsqueda lleva por nombre **Lignocellulosic biomass AND Mechanical treatment AND chemical treatment AND physical treatment AND biogas** con un total de 187 publicaciones para la base de datos Scopus y 29 publicaciones para la base de datos DOAJ, por último la cuarta ecuación de búsqueda lleva por nombre **(lignocellulosic residues AND pre-treatments) AND (biogas AND enzymatic hydrolysis AND lignin AND cellulose AND hemicellulose)** con un total de 21 publicaciones para la base de datos Scopus y 17 publicaciones para la base de datos DOAJ. Como resultado se escogió la ecuación de búsqueda número uno ya que cuenta con el número de publicaciones y con la información más relevante para el desarrollo de Vigilancia Tecnológica, la ecuaciones dos, tres y cuatro son tenidas en cuenta para el desarrollo de la investigación y se consolidaron en los anexos uno, dos y tres. Para el desarrollo de la Vigilancia Tecnológica se realizó una búsqueda de patentes otorgadas, una búsqueda de información en la bases de datos ya mencionadas utilizando como filtros los años comprendidos entre 2015 a 2020, por último se realizó un análisis bibliométrico con la información de las bases de datos con el fin de escoger la tecnología o pre tratamiento más efectivo a la hora del aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica y así mismo identificar las condiciones experimentales más eficientes para la mejora en la producción de biogás.

En la **Tabla 1** se sintetiza la información con respecto a las patentes más relevantes para la ecuación de búsqueda **lignocellulosic biomass AND pre treatment AND biogas**. Esta búsqueda se realizó en el motor de búsqueda Espacenet, la cual arrojó como resultado 237 patentes aprobadas para el rango de 6 años el cual está comprendido del año 2015 al 2020, se sintetizó la información con el fin de ubicar las patentes más relevantes para la investigación, arrojando como resultado 5 patentes. La primera patente tiene como código **CN111172198A** y lleva por título: **Método de pretratamiento de lodos de biogás de biomasa lignocelulósica y método de producción de biogás** la cual tiene como objetivo proporcionar un pretratamiento de purín de biogás, con biomasa lignocelulósica, con operatividad barata y aplicación a gran escala. Este es un método para producir biogás y resolver el problema del alto costo de pretratamiento. Este método utiliza paja de arroz, paja de maíz o algodón como materia prima, y se realiza a través de dos pasos, el primero es el secado y la pulverización de la biomasa y el segundo es la mezcla de agua con la suspensión de biogás en proporciones 4:1 o 3:2 proveniente de la fermentación anaeróbica para luego añadir y agitar la biomasa a 500 rpm y posteriormente mezclarla a una temperatura ambiente de entre 20 y 30 °C para luego someterla durante 1 día a tratamiento estático. Este proceso da como resultado una producción de biogás de 40,83 L/d o 57,90% [1]. La siguiente patente con código **AU2018370156A1** y lleva por título: **Pretratamiento microbiano para la conversión de biomasa en biogás** la cual tiene como objetivo realizar un tratamiento previo a la biomasa basado en pasteurizar el contenido antes de la digestión anaeróbica con una bacteria u organismo capaz de descomponer la lignocelulosa (por ejemplo, celulosa, hemicelulosa, lignina, bacterias, etc.). Este tratamiento se realiza en un tanque de mezcla, en donde se agrega biomasa previamente molida con agua en composiciones de 2 hasta 50% y se calienta entre 1 y 6 horas a una temperatura que puede variar entre 60 y 100 °C, lo que produce la expulsión de CO₂ y facilita la digestión realizada por los microbios. Este sistema ha demostrado ser eficaz para promover la digestión anaeróbica y no introduce ningún producto químico dañino además de no dañar el entorno ambiental para las bacterias anaeróbicas en la digestión, y esto se puede evidenciar ya que se obtiene una eficiencia en la producción de biogás de 76% [2]. La siguiente patente con código **CN105132469A** y lleva por título: **Método para usar lignocelulosa para producir biogás** la cual tiene como objetivo realizar la combinación de pretratamiento de fermentación anaeróbica y fermentación aeróbica, como primer paso la materia prima lignocelulósica es pulverizada y agregada a una solución de cultivo microbiano producida a partir de heces animales. Esta solución se encuentra a una temperatura de 35 a 45 °C, tiene un pH promedio de 6 a 8, y un tiempo de aireación entre 10 y 40 minutos. El tiempo de retención hidráulica para el desarrollo del pretratamiento es de 12 a 48 horas, luego el líquido de fermentación pretratado se introduce en un reactor de fermentación anaeróbica para fermentación anaeróbica para producir biogás. Este método ha comprobado tener una efectividad del 57% [3]. La siguiente patente con código **CN111394402A** y lleva por título: **Método para la coproducción de ácidos grasos de cadena media y biogás mediante el uso de materia prima de fibra de madera** la cual tiene como objetivo es proporcionar un método para coproducir ácidos grasos de cadena media y biogás a partir de materias primas lignocelulósicas. Este método utiliza fibras de madera o de paja como materia prima, la cual es pulverizada y mezclada con un compuesto alcalino con proporciones 1:10 de sólido-líquido. En este proceso el tiempo de retención puede variar entre 12 y 48 horas a temperaturas que van desde los 30 hasta los 80 °C, para al final obtener un hidrolizado y un residuo sólido. Posteriormente el

hidrolizado es mezclado con lodos provenientes de un proceso de digestión anaeróbica y se le realiza una calibración en el pH con valores entre 5,0 y 5,5. Por último se realiza un proceso de fermentación para la producción de biogás, el cual tiene un tiempo de retención de 15 a 30 días y se realiza a temperaturas que varían entre los 25 y 35 °C. Este método comprueba tener un aumento en porcentaje de biogás de 60% [4]. Por último tenemos la patente con código **CN111593076A** y lleva por título: **Método para mejorar la eficiencia de la producción de biogás a partir de paja mediante el pretratamiento de licor verde** la cual tiene como objetivo pretratar la biomasa de paja mediante el uso de licor verde, ya que se ha comprobado que es capaz de reducir el contenido de lignina en la estructura de la biomasa lignocelulósica. Para lograr esto es necesario añadir licor verde en concentraciones de 1 a 1,5 ml/g a la biomasa y luego someterla a un proceso de vulcanización, el cual se realiza a temperaturas que varían entre los 50 y 90 °C durante un tiempo aproximado de 3 horas. Este método ha registrado aumentos en los porcentajes de eficiencia de producción de biogás que van desde 10 hasta 50% dependiendo de la materia prima utilizada y las concentraciones de álcali en el licor verde [5].

Consolidación de patentes para ecuación de búsqueda #1

Ecuación de Búsqueda	Código de la Patente	Resumen
<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas</i>	CN111172198A	La invención describe un método de pretratamiento en suspensión de biogás de biomasa lignocelulósica y un método para producir biogás, y pertenece al campo de la utilización eficiente de recursos de residuos sólidos orgánicos. Los métodos resuelven el problema de que los costos de pretratamiento son altos y la operatividad es deficiente en un proceso de pretratamiento de paja actual, y la suspensión de biogás del proyecto de biogás actual no se puede utilizar completamente para causar contaminación ambiental secundaria. El método de pretratamiento proporcionado por la invención comprende las siguientes etapas: etapa a, secado y trituración de la biomasa lignocelulósica; y paso b, mezclar uniformemente la lechada de biogás obtenida por fermentación anaeróbica y agua, agregando la biomasa lignocelulósica procesada
<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas</i>	AU2018370156A1	Un sistema de degradación de biomasa con digestión anaeróbica que incluye un pretratamiento biológico con organismos que degradan los materiales lignocelulósicos antes de la digestión anaeróbica o para su uso como materia prima para otras reacciones.
<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas</i>	CN105132469A	La invención describe un método para usar lignocelulosa para producir biogás. El método se caracteriza por incluir un proceso de pretratamiento de fermentación de oxígeno facultativo y un proceso de fermentación

		anaeróbica, para ser más específico, las materias primas de lignocelulosa pulverizada se agregan a la solución de cultivo de desechos animales. El método tiene las ventajas de que el volumen del reactor de pretratamiento se reduce en gran medida y se logra un bajo costo de inversión.
<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas</i>	CN111394402A	La invención proporciona un método para la coproducción de ácido graso de cadena media y biogás a partir de una materia prima de fibra de madera. El método comprende las siguientes etapas: (1) mezclar una materia prima de fibra de madera triturada con una solución alcalina para el pretratamiento, y llevar a cabo la separación sólido-líquido de la mezcla pretratada para obtener respectivamente un hidrolizado y residuos sólidos; (2) mezclar el hidrolizado con lodo digerido anaerobio, ajustar un valor de pH a 5.0-5.5, continuar la fermentación anaeróbica y agregar etanol o ácido láctico en el proceso de fermentación para obtener respectivamente el ácido graso de cadena media y el licor de fermentación extraído; y (3) mezclar los residuos sólidos obtenidos en el paso (1) con el licor de fermentación extraído obtenido en el paso (2), y continuar realizando la fermentación anaeróbica durante 20-50 días para obtener el biogás.
<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas</i>	CN111593076A	La invención se refiere a un método para mejorar la eficiencia de la producción de biogás a partir de paja mediante el pretratamiento de licor verde. El método comprende los siguientes pasos: pretratar la biomasa de la paja utilizando el licor verde, sumergir la biomasa de la paja en el licor verde, realizar la separación sólido-líquido en el licor mixto pretratado, realizar la fermentación anaeróbica en el sólido y recolectar biogás, en donde el licor verde es una medicina líquida que se forma disolviendo en agua una masa fundida recuperada en un sistema de recuperación de álcali mediante un método de pulpa con sulfato. La concentración total de álcali del licor verde es 80-100 g / L, y el grado de vulcanización es 20% -40%. En comparación con el método de

		pretratamiento que utiliza hidróxido de sodio de alto coste y similares, el método proporcionado por la invención puede reducir en gran medida el coste del agente de pretratamiento. El licor verde se puede reciclar de 5 a 6 veces.
--	--	---

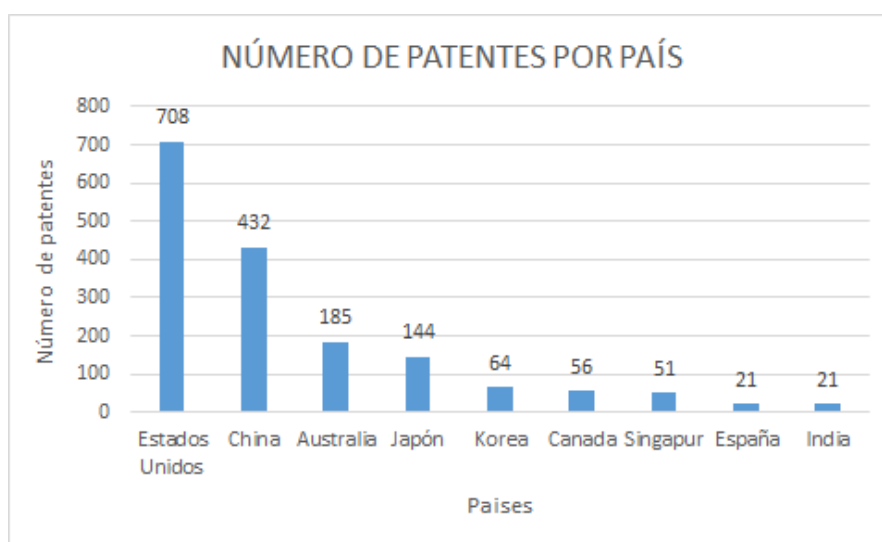
Tabla 1: Consolidación de patentes para Ecuación de búsqueda #1
Fuente: Autores

Gráficas para las patentes en Espacenet

En las siguientes gráficas se exponen los resultados obtenidos para la ecuaciones de búsqueda uno dentro de la plataforma Espacenet, analizando variables como la cantidad de patentes por país, por año y aplicantes u organizaciones, analizado en un periodo de 6 años comprendido entre 2015 y 2020.

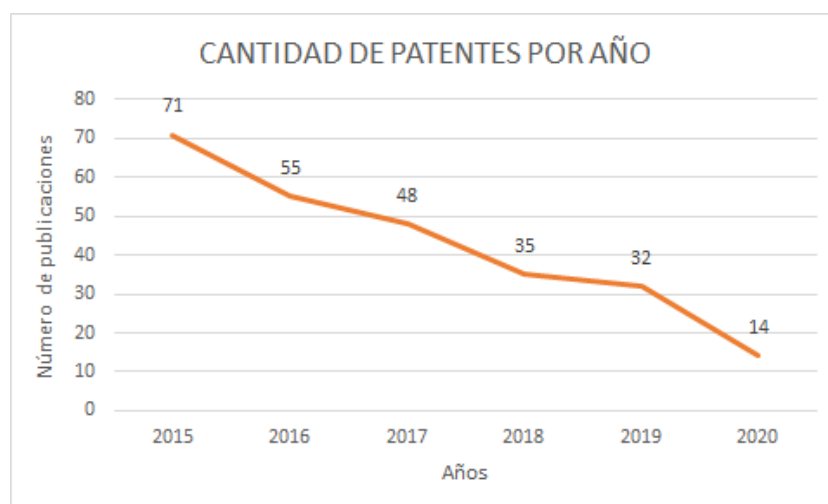
Ecuación de búsqueda #1: *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*

Mediante la ecuación de búsqueda *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas* se obtuvieron los datos de los países con mayor cantidad de patentes aprobadas en un rango de búsqueda de seis años, que abarca desde el 2015 hasta el 2020. Como se puede evidenciar en la **Gráfica 1**, el país con el mayor número de patentes es Estados Unidos, con un total de 708, seguido de China con 432 y Australia con 185.



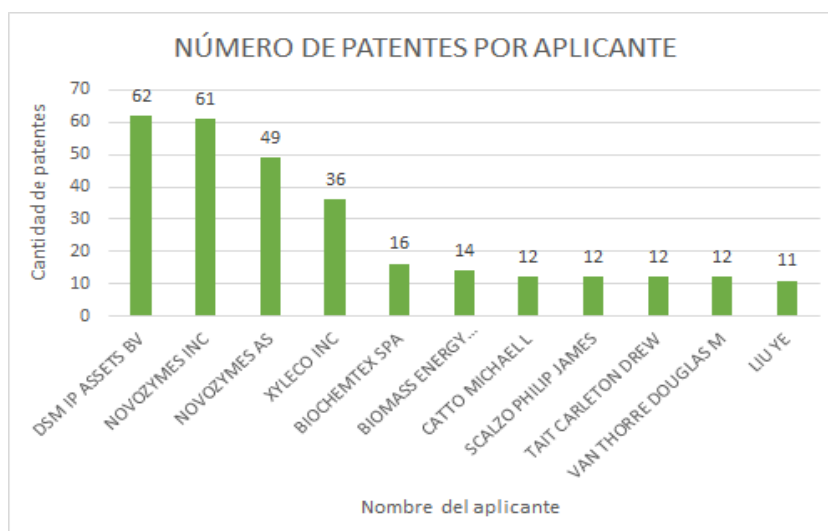
Gráfica 1: Número de patentes por país
Fuente: Autores

Mediante la ecuación de búsqueda *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas* se obtuvieron los datos correspondientes a la cantidad de patentes publicadas en durante el intervalo de años de 2015 a 2020 como se evidencia en la **Gráfica 2** arrojando como resultado un decrecimiento en la cantidad de patentes aprobadas debido a una gran ola investigativa en el año 2015 donde existía una problemática ambiental basada en el aprovechamiento de los residuos para la generación de energías renovables, se ve un decrecimiento importante a lo largo del tiempo debido a que las opciones para descubrir nuevas tecnologías y temáticas de investigación fueron agotándose. El decrecimiento más significativo se ve reflejado en el año 2020, en donde debido a la contingencia sanitaria se han visto muy limitadas las oportunidades de realizar una investigación así como una insuficiencia económica para sostener dichas investigaciones.



Gráfica 2: Cantidad de patentes por año
Fuente: Autores

Mediante la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se obtuvieron los datos correspondientes a la cantidad de entidades que generan patentes a lo largo del periodo de tiempo investigado como se evidencia en la **Gráfica 3**, arrojando como resultado que la entidad con mayor cantidad de patentes aprobadas es **DSM IP ASSETS** con 62 patentes, esta es una entidad que favorece la sostenibilidad, economía circular y el aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de energías renovables como solución a la grave situación que se ha venido presentando a lo largo de los tiempos, seguida por **NOVOZYMES INC** con 61 patentes, esta es una empresa dedicada a la investigación y desarrollo de enzimas y microorganismos de uso industrial e ingredientes para biofarmacéutica. La última entidad con mayor cantidad de patentes es **XYLECO INC** con 49 patentes, la cual es una entidad que está desarrollando un proceso para convertir biomasa en productos útiles, incluido el etanol celulósico.



Gráfica 3: Cantidad de patentes por aplicantes
Fuente: Autores

PUBLICACIONES INVESTIGATIVA BASE DATOS SCOPUS :

Scopus es una de las herramientas utilizadas para realizar la búsqueda de información, esta base datos nos permite filtrar la información por años y nos arroja distintas gráficas por cada una de las variables, esta base datos contiene información de artículos, resúmenes y revistas científicas. En la **Tabla 2** se muestra las ecuaciones de búsqueda en la base de datos con sus respectivos números de registro de la misma manera se exponen las gráficas con el fin de mostrar los resultados obtenidos para la ecuaciones de búsqueda uno dentro de datos Scopus, analizando variables como

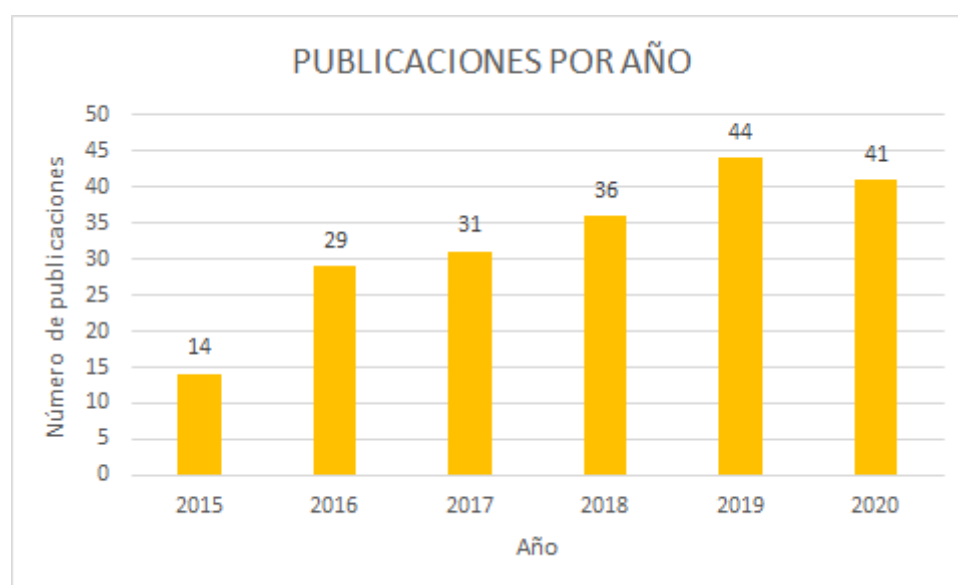
la cantidad de publicación por país, por año y aplicantes u organizaciones, analizado en un periodo de 5 años comprendido entre 2015 y 2020.

Bases De Datos	Ecuación de Búsqueda	Número de Registros	Fecha Búsqueda
Scopus	<i>lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas</i>	195	24 de Febrero de 2021
Scopus	<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND technology AND biogas</i>	35	24 de Febrero de 2021
Scopus	<i>Lignocellulosic biomass AND Mechanical treatment AND chemical treatment AND physical treatment AND biogas</i>	187	24 de Febrero de 2021
Scopus	<i>(lignocellulosic residues AND pre-treatments) AND (biogas AND enzymatic hydrolysis AND lignin AND cellulose AND hemicellulose)</i>	21	24 de Febrero de 2021

Tabla 2. Listado de publicaciones para la base de datos Scopus
Fuente: Autores

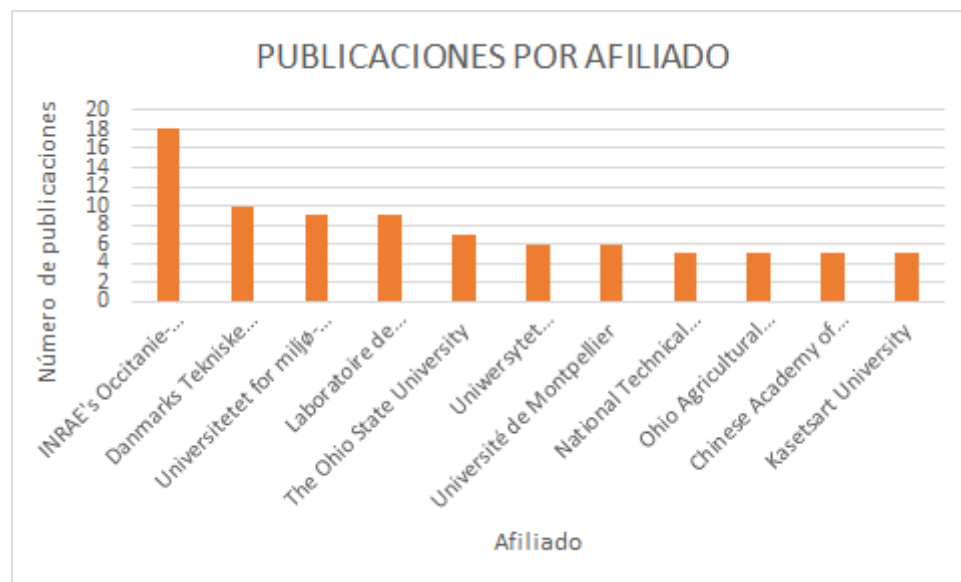
Ecuación de búsqueda #1: *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*

Mediante la ecuación de búsqueda (*lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*) se obtuvieron los datos correspondientes a la cantidad de publicaciones publicadas durante el intervalo de años de 2015 a 2020, como se evidencia en la **Gráfica 4**, arrojando como resultado que para este intervalo de tiempo se obtuvieron 195 publicaciones en total, los años con más publicaciones fueron los años del 2018 con 36 publicaciones, el año 2019 con 44 publicaciones y por último el año 2020 con 41 publicaciones, lo que se evidencia en la es un aumento constante en la cantidad de publicaciones sobre el tema investigado.



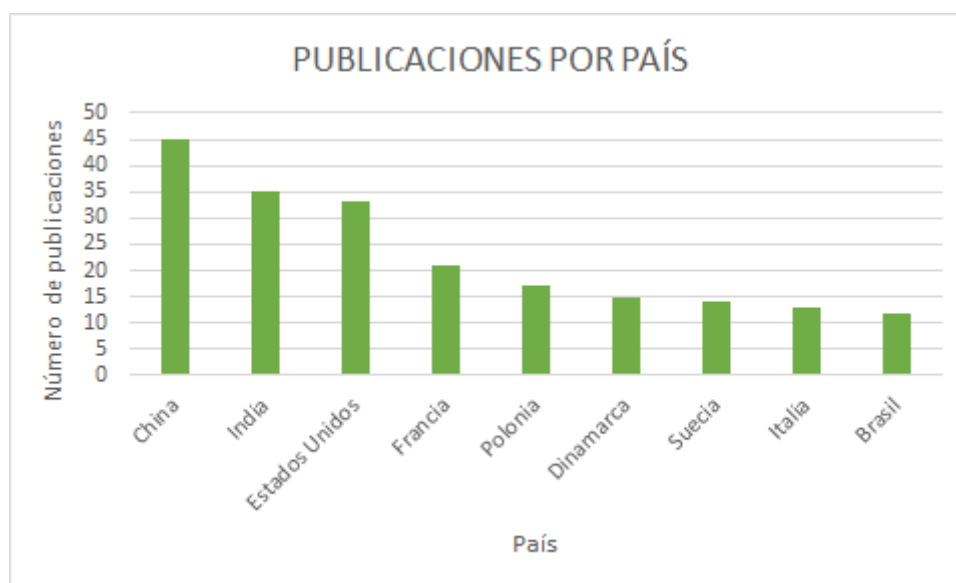
Gráfica 4: Cantidad de publicaciones por año
Fuente: Autores

Mediante la ecuación de búsqueda (***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas***) se obtuvieron los datos correspondientes a la cantidad de entidades que generan investigación y publican a lo largo del periodo de tiempo investigado como se evidencia en la **Gráfica 5**, arrojando como resultado que la entidad con mayor cantidad de publicaciones es **INRAE'S OCCITANIE-MONTEPELLIER CENTRE** con 12 publicaciones esta es una entidad de origen francesa la cual basa sus investigaciones en temas de agricultura, alimentación y medio ambiente. Orientado internacionalmente con una mayoría de publicaciones confirmadas con al menos un país extranjero, se caracteriza por su apertura a los países del sur y su especificidad mediterránea. La segunda entidad con mayor número de publicaciones tiene por nombre **DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET** con 6 publicaciones esta es una entidad con un fuerte investigativo basado en las energías renovables, esta entidad está ubicada en Dinamarca, este país es pionero en las energías renovables haciendo un gran énfasis en la energía eólica teniendo como oportunidad incursionar en energías de otro tipo, por último tenemos la entidad de **UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIO VITENSKAP** con 5 publicaciones esta entidad se centra principalmente en Ciencias Ambientales, Medicina Veterinaria, Ciencia de los Alimentos, Biotecnología, Acuicultura y Desarrollo de Negocios, La investigación relacionada con la salud de NMBU está relacionada con los alimentos saludables, el agua potable y el medio ambiente y los muchos desafíos relacionados en los países en desarrollo.



Gráfica 5: Cantidad de publicaciones por afiliado
Fuente: Autores

Mediante la ecuación de búsqueda (***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND technology AND biogas***) se obtuvieron los datos correspondientes a los países con mayor cantidad de publicaciones en un rango de búsqueda de cinco años, que abarca desde el 2015 hasta el 2020. Como se evidencia en la **Gráfica 6**, los países pioneros en investigación son China con 45 publicaciones, India con 35 publicaciones y por último Francia con 34 publicaciones.



Gráfica 6: Cantidad de publicaciones por país
Fuente: Autores

Gráficas para las publicaciones de la base de datos “DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS”

En la **Tabla 3** se muestran los resultados de la investigación con respecto a la base de datos **DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS**, arrojando como resultados: Para la ecuación de búsqueda “**lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas**” encontramos 31 artículos relacionados con el tema de interés, para la ecuación de búsqueda “**lignocellulosic biomass AND pretreatment AND technology AND biogas**” se encontraron 29 artículos, para la ecuación de búsqueda “**lignocellulosic biomass OR Mechanical treatment OR chemical treatment OR physical treatment AND biogas**” se encontraron 29 para la ecuación de búsqueda antes mencionada se realizó un cambio en los parámetros de búsqueda para ampliar los resultados de la investigación, por último para la ecuación de búsqueda “**(lignocellulosic residues AND pre-treatments) OR (biogas AND enzymatic hydrolysis OR lignin OR cellulose OR hemicellulose)**” se encontraron 17 artículos. La base de datos utilizada para dicho análisis nos permite un acceso gratuito a todos los artículos relacionados con el tema de interés, en un periodo de 6 años que abarca desde 2015 hasta el 2020.

Bases De Datos	Ecuación de Búsqueda	Número de Registros	Fecha Búsqueda
DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	<i>lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas</i>	31	26 de Febrero de 2021
DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	<i>lignocellulosic biomass AND pretreatment AND technology AND biogas</i>	29	26 de Febrero de 2021
DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	<i>lignocellulosic biomass OR Mechanical treatment OR chemical treatment OR physical treatment AND biogas</i>	29	26 de Febrero de 2021

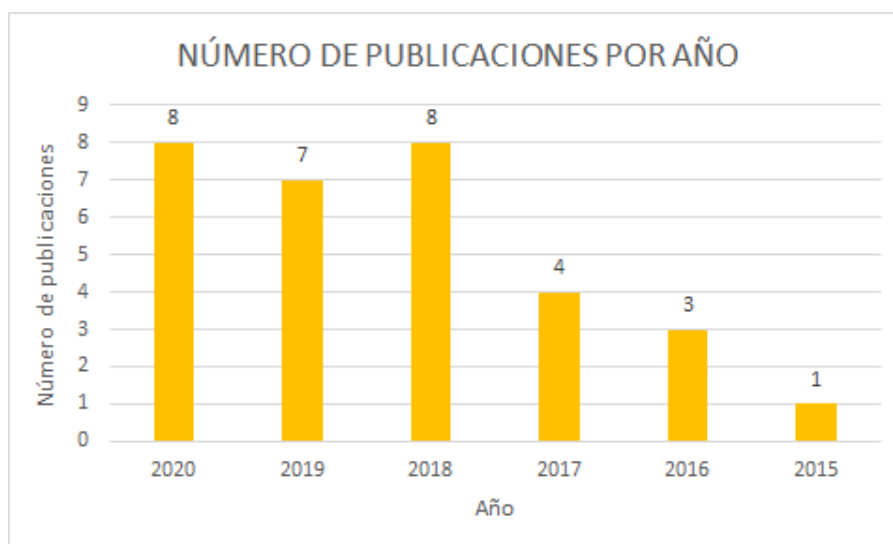
DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	(lignocellulosic residues AND pre-treatments) OR (biogas AND enzymatic hydrolysis OR lignin OR cellulose OR hemicellulose)	17	26 de Febrero de 2021
-----------------------------------	--	----	-----------------------

Tabla 3. Listado de publicaciones para la base de datos DIRECTORY OF OPEN ACCESS

Fuente: Autores

1. ***lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas***

Mediante la ecuación de búsqueda (***lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas***) se obtuvieron los resultados correspondientes a la cantidad de publicaciones por año como se evidencia en la **Gráfica 7**. Arrojando como resultado que para el año 2020 y 2018 se cuenta con el mayor número de publicaciones con un total de 8 seguido del año 2019 con un total de 7 publicaciones, generando un decrecimiento en la cantidad de publicaciones para el 2017 la cual obtiene un total de 4 publicaciones seguido con el año 2016 con un total de 3 publicaciones, por último el año 2015 con 1 publicación.

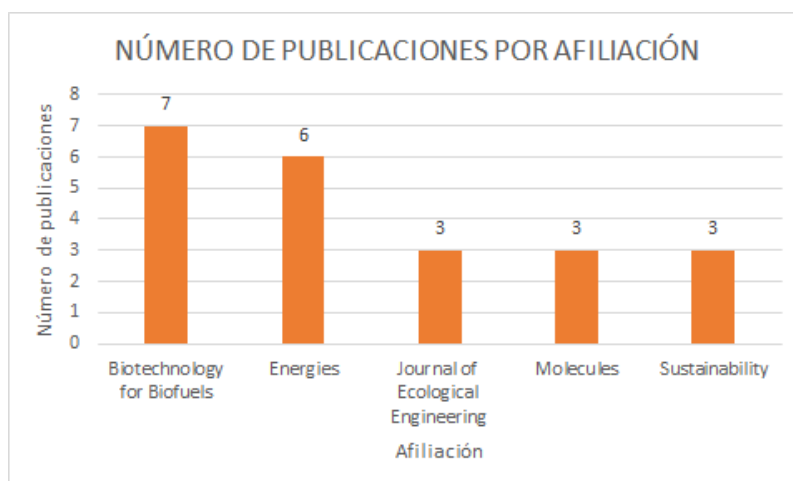


Gráfica 7: Número de publicaciones por año

Fuente: Autores

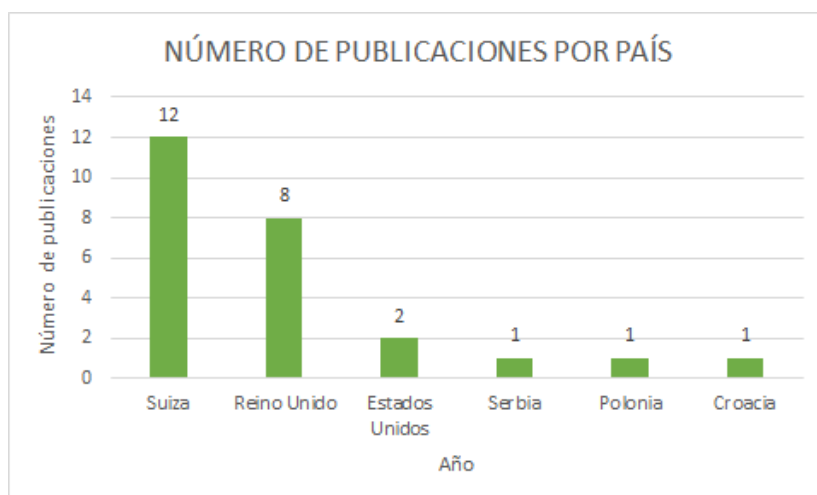
Mediante la ecuación de búsqueda (***lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas***) se obtuvieron los resultados correspondientes a la cantidad de revistas científicas encargadas de publicar proyectos de investigación y sus resultados durante el periodo de tiempo definido como se evidencia en la **Gráfica 8**, arrojando como resultado que la revista con el mayor número de publicaciones con un total de 7, es "**Biotechnology for Biofuels**" cuya línea de investigación es la comprensión y el avance de la aplicación de la biotecnología, la bioingeniería y la genética para mejorar las materias primas de plantas, algas y otras materias primas carbonáceas, así como el diseño de los sistemas de conversión. Su mejora es de relevancia crítica para la producción biológica de biocombustibles, bioquímicos y biomateriales derivados de biomasa vegetal o acuática, intermedios derivados de biomasa o CO₂. La siguiente revista con el mayor número de publicaciones lleva por nombre "**Énergies**" con un total de 6 publicaciones, esta revista basa sus publicaciones en temas multidisciplinarios en ingeniería e investigación energética, nos muestra un panorama de artículos relacionados a la conservación de la energía, la eficiencia energética, la biomasa y la bioenergía, la energía renovable, la oferta y la demanda de electricidad, el almacenamiento de energía, la energía en los edificios y sobre cuestiones económicas y políticas, siempre que dichos temas se encuentren en el contexto del alcance multidisciplinario más amplio de la energía. Las siguientes revistas con mayor número de publicaciones llevan por nombre "**Journal Ecological Engineering**", "**Molecules**" y "**Sustainability**" con un total de 3 publicaciones, la primera revista basa su línea en evaluación física de materiales que se pueden utilizar para la restauración ecológica, estudios de modelos pequeños realizados en el laboratorio o invernadero con estudios

artificiales (de aguas residuales) o cultivos, o estudios de casos sobre el tratamiento convencional de biomasa residual y eutrofización que no ofrecen un enfoque de restauración de ecosistemas dentro del documento. La segunda revista basa su línea de investigación en la transformación de biomasa residual con pretratamientos químicos con el fin de mejorar la bioconversión para el aumento de la producción de biogás, la última revista basa su investigación en estudios relacionados con la sostenibilidad y el desarrollo sostenible de la misma manera esta revista hace un énfasis importante en el aprovechamiento de biomasa agroindustrial con el fin de mitigar la acumulación de residuos proponiendo distintas tecnologías para el aprovechamiento del mismo.



Gráfica 8: Número de publicaciones por afiliación
Fuente: Autores

Mediante la ecuación de búsqueda (***lignocellulosic AND biomass AND pretreatment AND biogas***) obtuvimos los resultados correspondientes a la cantidad de publicaciones registradas en cada uno de los países dentro de un intervalo de tiempo correspondiente a 5 años, como se evidencia en la **Gráfica 9** arrojando como resultado que el país con mayor número de publicaciones es **Suiza** con 12 publicaciones, este país hace una fuerte investigación en el aprovechamiento de la biomasa de segunda generación es decir biomasa residual de cultivos esto con el fin generar un valor agregado, el segundo país con mayor número de publicación es **Reino Unido** con un total de 8 publicaciones, este país desde el año 2016 ha venido en una revolución llamada “gas verde” lo que pretende dicha revolución es la disminución de combustibles fósiles y el aprovechamiento de biomasa para la producción de biogás y biocombustibles, cabe resaltar que este país ha implementado 96 plantas nuevas para el aprovechamiento de la biomasa. El siguiente país con mayor número de publicaciones es **Estados Unidos** con un total de 2 publicaciones, este país posee una gran problemática en cuanto el almacenamiento de residuos sólidos lo que conlleva a generar un aprovechamiento inmediato para la reducción de los mismos, los últimos países con la mayor número de publicaciones son **Serbia, Polonia y Croacia** con un total de 1 publicación.



ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO VOSviewer: Base datos Scopus

VOSviewer es un software que permite construir y visualizar redes bibliométricas. Estas redes pueden incluir, revistas, investigadores o publicaciones individuales, y pueden construirse sobre la base de la citación, el acoplamiento bibliográfico, la cocitación o las relaciones de coautoría. VOSviewer también ofrece una funcionalidad de minería de textos que puede utilizarse para construir y visualizar redes de coocurrencia de términos importantes extraídos de un cuerpo de literatura científica. A continuación, se presenta un análisis comparativo entre los documentos investigados para cada una de las ecuaciones de búsqueda.

Ecuación de búsqueda #1: *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*

Para la ecuación de búsqueda *lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas* se realizó un análisis bibliométrico con el programa VOSviewer como se muestra en la Figura 2. Los países presentes en este análisis bibliométrico pretenden utilizar tecnologías de aprovechamiento de biomasa para su desarrollo energético, este tipo de tecnología ataca directamente el problema de acumulación de residuos, de la misma manera contribuye al tratamiento de residuos sólidos urbanos además aportar productos como biogás y digestato los cuales siendo tratados correctamente pueden generar energía eléctrica en el caso de biogás o fertilizantes orgánicos en el caso de los lodos y poder generar ingresos que hagan de este un proceso económicamente viable. Para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta el parámetro relacionado con citaciones y países, arrojando como resultado que el país con mayor número de citaciones es **CHINA** con 828, este país cuenta con uno de los pretratamientos más eficientes para aumentar el rendimiento de la producción de biogás en un 60% y una reducción del 45,4% en el tiempo de digestión, consiste en realizar una combinación entre un tratamiento térmico y uno alcalino, el tratamiento térmico consiste en aumentar la temperatura a 175 °C con el fin de solubilizar la hemicelulosa y la lignina, generando una hidrólisis de la hemicelulosa y fomentar la formación de ácidos al mismo tiempo agregar una dosis al 8% de NaOH [6] con el fin de provocar que la biomasa se expanda, lo cual la hace más accesible a las enzimas y bacterias, posteriormente la biomasa expandida estará más susceptible a una digestión anaeróbica la cual favorece la producción de biogás. Como resultado se obtuvo un aumento en el rendimiento del 21,3% en la producción de biogás. Otro pretratamiento postulado por dicho país y altamente eficiente tiene como fin utilizar un proceso avanzado de oxidación con un fotocatalizador de óxido metálico (Óxido Cúprico) combinado con radiación ultravioleta (UV). Se examinó el **Óxido Cúprico** en diferentes dosis de 0, 1, 2, 3 y 4% (p/p) junto con **irradiación UV** durante 0, 60, 120 y 180 min. Los resultados experimentales revelaron que el Óxido Cúprico al 4% combinado con la irradiación UV a 180 minutos [7] causó una mayor liberación de lignina y un aumento en la producción de biogás en un 57%.

El siguiente país con mayor número de citaciones es **India** con 592 este país propone un pretratamiento con Fenton, ozono y peroxidasa de rábano el cual es aplicable a residuos lignocelulósicos para la mejora en la producción de biogás a través de la ruptura de los complejos lignocelulósicos. El pretratamiento se llevó a cabo en diferentes condiciones experimentales: **Fenton** con una relación disolvente/ biomasa de : 1:5, 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 y 1: 50, una dosis: 200 mg/L: 4000 mg/L a 800 mg/L 16000 mg/L y un tiempo de retención hidráulica de 30 min–120 min, **Ozono** en condiciones de pH: 3, 5, 7 y 9 una dosis de: 0,2 g/h a 2,5 g/h y un tiempo de retención hidráulica de 15 min–60 min, por último se evalúa el disolvente **Peróxido de hidrógeno** (H₂O₂) con una dosis: 1 ml a 5 ml, en condiciones de PH: 3,5,7 y 9, con un tiempo de retención hidráulica de 10 min–40 min [8]. Como resultado se obtuvo la degradación de la celulosa, hemicelulosa y lignina en un 13%, 10,3% y 3,5% respectivamente, esta reducción se generó a partir del tratamiento de Ozono y peróxido de hidrógeno con dosis de 1,8 g/h con un tiempo de retención de 30 minutos y con 1 ml de peróxido de hidrógeno a un PH de 3 con un tiempo de retención de 40 minutos, arrojando un aumento del 63% en la producción de biogás. El siguiente pretratamiento se realiza en un medio alcalino conjunto de la codigestión anaeróbica con el estiércol de vaca, se pretrata con una solución al 2% (p/v) de NaOH y una solución al 2% (p/v) de Ca(OH)₂ a temperatura ambiente durante un día. La biomasa tratada se mezcla con estiércol de vaca en proporción 1: 2 y posteriormente se agrega agua en proporción 1: 3, se evalúa la producción de biogás en el reactor con la mezcla con temperaturas de 35 y 55 °C [9]. Como resultado se obtiene que la mayor producción de biogás se

genera con el tratamiento con NaOH seguido del tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 55 °C, con una producción total de biogás del 54%.

El siguiente país con mayor número de citaciones es **Estados Unidos** con 552, este país propone un tratamiento con base débil, este pretratamiento fue investigado por su capacidad de mejorar la producción de biogás. Se pretrató la biomasa con 3%, 5% y 7% de Na_2CO_3 como base débil. Arrojando como resultado que en el grupo del tratamiento con Na_2CO_3 al 5%, la celulosa y la hemicelulosa se retuvieron de manera efectiva, con una eliminación eficiente de la lignina. Las tasas de eliminación de celulosa, hemicelulosa y lignina fueron del 27,9%, 20,4% y 31,0%, respectivamente, el contenido de biogás estuvo en el rango del 53,3-77,3%. En el grupo de tratamiento con Na_2CO_3 al 7% las tasas de eliminación de celulosa, hemicelulosa y lignina fueron del 12,9%, 10,4% y 27,8%, respectivamente y el contenido de biogás estuvo en el rango del 33,3-47,3%. La celulosa y las hemicelulosas con el grupo de tratamiento al 5% se degradaron 59,3% y 56,3% después de la Digestión Anaerobia la cual tomó 20 días alcanzar el 80% de la producción máxima [10]. Otro tratamiento el cual es altamente eficiente está basado en la bioconversión del material lignocelulósico a partir de hongos, para esto se utilizaron tres tipos de hongos los cuales fueron: **Pleurotus ostreatus, Phanerochaete chrysosporium y Ganoderma lucidum**. Posteriormente se hizo un ensayo bioquímico de metano utilizando como método cualitativo la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo y radiografía de acción y en el método cuantitativo se evaluó la demanda química de oxígeno soluble y ácidos grasos volátiles. La cuantificación de CH_4 se realizó mediante el método de desplazamiento de agua, donde el CH_4 producido desplaza el líquido y el CO_2 se disuelve en el líquido formando un precipitado [11], arrojando como resultado que el rendimiento de ácido nitriloacético de los hongos pretratados con Phanerochaete chrysosporium fue aproximadamente 4,44 veces mayor que el del control en el séptimo día del período de hidrólisis, mientras que Pleurotus ostreatus y Ganoderma lucidum mostraron un aumento de 2,66 y 1,73 veces con respecto a una muestra de biomasa en estudio sin tratar en el séptimo día. La producción máxima de biogás para Phanerochaete chrysosporium (2991 mg / L) y Ganoderma lucidum (1984,5 mg / L) se obtuvo en la semana 4.

El siguiente país con mayor número de citaciones es **Francia** con 485, este país propone un tratamiento el cual consiste en agregar cal (CaO) con baja adición de agua, el pretratamiento se realizó través de dos diseños experimentales variando las concentraciones de CaO , las dosis de cal oscilaron entre el 2,5% y el 17,5% con un tiempo de retención 1, 3 o 5 días, luego la biomasa pretratada fue co-digerida con estiércol de ganado en reactores de lecho de lixiviación seca [21]. Los pretratamientos de CaO llevaron a un aumento del 14-37% en la producción de biogás se demostró que al permanecer alto tiempo de contacto favorece la producción de metano. De acuerdo con estos resultados la biomasa fue pretratada con 5 y 10% de CaO durante 5 días, luego co-digerido con estiércol en reactores de lecho de lixiviación seca con el fin de aumentar la producción de biogás.

Por último el país con un el mayor número de citaciones es **Brasil** con 420 se plantea una tratamiento llamado ***“Effect of substrate concentrations on methane and hydrogen biogas production by anaerobic digestion of a cassava starch-based polymer”*** tiene como fin evaluar el proceso de digestión anaeróbica de un polímero de almidón de yuca, se determinó la carga orgánica ideal para la remoción de sólidos y producción de metano e hidrógeno, para llevar a cabo el proceso se utilizó un reactor con sistema de agitación y mezcla para la fase acidogénica y un reactor tubular para la fase metanogénica, siendo un proceso semicontinuo. Para la fase experimental se definieron concentraciones de 8, 10, 12 y 14 g/L , con un tiempo de retención hidráulico de 5 días para el reactor acidógeno y 20 días para el metanogénico [12]. Como resultado se obtuvo que los mejores rendimientos de metano y biogás se generaron a partir de la concentración de inóculo de 10 g/l presentando 19,9 mL en la fase acidogénica y 249,1 mL en la fase metanogénica, mostrando un aumento producción de biogás generando 43,2% y 76,6% de metano respectivamente.

Red bibliométrica “Citaciones Vs País”

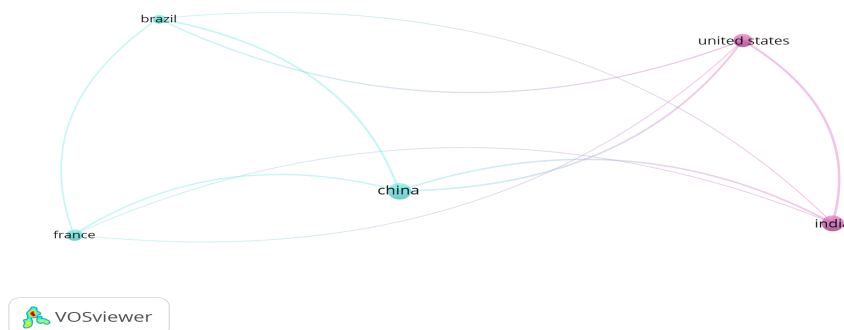


Figura 2: Red bibliométrica Citaciones Vs País
Fuente: Autores

Para la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se realizó un análisis bibliométrico con el programa VOSviewer como se muestra en la Figura 3, Para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta el parámetro relacionado con citaciones y documentos, arrojando como resultado que el documento más citado lleva por nombre **“Review of feedstock pretreatment strategies to improve anaerobic digestion: from laboratory-scale research to large-scale application”** y cuenta con 258 citaciones, este artículo nos ayuda a la Vigilancia Tecnológica ya que proporciona una visión amplia de los pretratamientos más efectivos aplicables a la biomasa lignocelulósica, el objetivo principal del pretratamiento de la biomasa lignocelulósica es la deslignificación de la materia prima, la solubilización de azúcares y la reducción de la cristalinidad de la celulosa, siendo la deslignificación el paso más importante para la mejora de la producción de metano. Los pretratamientos más importantes anunciados por este documento son la exposición a vapor donde se aplica vapor saturado a alta presión durante unos minutos sobre la biomasa lignocelulósica molida, luego la presión se reduce rápidamente sometiendo la biomasa a una descompresión explosiva. Debido a las altas temperaturas y presiones impuestas, se produce la degradación de la hemicelulosa y en ciertos casos la transformación de la lignina, lo que mejora la hidrólisis de la celulosa y aumenta el rendimiento de biogás. Otro tratamiento es la combinación de explosión de vapor con agentes químicos, como bases, los pretratamientos alcalinos involucran soluciones como NaOH, Ca y amoníaco este tratamiento es más eficaz para la degradación de la lignina, provocando la despolimerización y la división de enlaces lignina-carbohidrato. También mejoran la solubilización de la hemicelulosa en sus oligómeros. Los pretratamientos alcalinos pueden ser los más adecuados para mejorar el proceso de digestión anaeróbica. Por último, se hace una innovación, el pretratamiento de hongos es particularmente interesante porque la biomasa lignocelulósica puede ser degradada por hongos de pudrición blanca, parda y blanda. Entre ellos, los hongos de pudrición blanca son los más investigados por su capacidad para deslignificar biomasa. Los pretratamientos de hongos se llevan a cabo como procesos de fermentación aeróbica en estado sólido, que requieren bajos volúmenes de reactor y cantidades de agua [13].

El siguiente documento lleva por nombre **“Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current status and challenges”** con 107 citaciones este documento nos muestra los distintos rendimientos de los pretratamientos más importantes para bioconversión de biomasa lignocelulósica a biogás, iniciando con un pretratamiento alcalino combinado con estiércol de animal, el cual se hace asequible para diversos residuos agrícolas con alto contenido de lignina mediante la recuperación de celulosa biodigerible. El tratamiento alcalino inicia con una producción de biogás en control de 466 ml/g, este tratamiento combinado con estiércol bajo una condición de 6% de NaOH y 55 °C mostró un aumento en la producción de biogás de un 26%. El rendimiento en la producción de biogás se mejoró en un 33,6% y un 30,6% con la adición de un 10% de NaOH a 100 °C y un 2% de HCl a 37 °C, respectivamente [14]. El pretratamiento alcalino a una temperatura más alta podría mejorar termo químicamente el rendimiento de producción de metano sobre la digestión anaerobia de la biomasa lignocelulósica, para aumentar el rendimiento la biomasa fue sometida a un pretratamiento térmico a 200 °C durante 10 minutos con la adición de 5% de NaOH, el rendimiento de producción de biogás alcanzó 40%.

Red bibliométrica “Citaciones Vs Documentos”

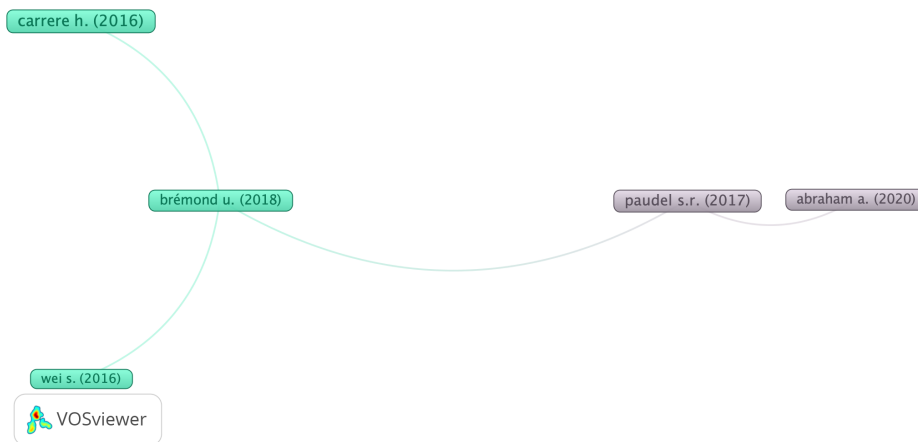


Figura 3: Red bibliométrica Citaciones Vs Documentos
Fuente: Autores

Para la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se realizó un análisis bibliométrico con el programa VOSviewer como se muestra en la Figura 4, Para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta el parámetro relacionado con citas y autores arrojando como resultado que el autor con más citas es **Carrere h.** con 406 este autor plantea en sus líneas de investigación el aprovechamiento de la biomasa para generar un valor agregado, de la misma manera propone distintas tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica con sus respectivos rendimientos enfocados hacia la producción de biogás. El segundo y el tercer autor con mayor número de citas son **Tsapekos P. y Angelidaki I.** con 170, estos autores enfocan su línea de investigación a los pretratamientos para mejorar a la degradabilidad de la celulosa, hemicelulosa y lignina, presentando en su investigación combinaciones en los tratamientos para aumentar el acceso de las enzimas y las bacterias para poder realizar la digestión anaeróbica de manera más eficiente uno de los pretratamientos más eficientes que han propuesto es la combinación de un pretratamiento térmico con uno alcalino que aumenta la producción de biogás en 60%, Por último tenemos **Zieliński M.** con 30 citas, este autor enfoca su línea de investigación en la innovación de tecnologías y pretratamientos asociados al aprovechamiento de biomasa agroindustrial una de sus mejores aplicaciones es el tratamiento de biomasa a partir de la cepa de hongos ya que los pretratamientos fúngicos tienen la ventaja de ser de bajo costo. Una de las investigaciones más importantes de este autor se realizó a partir de la cepa *Polyporus brumalis* generando un aumento en la producción de biogás del 40% generando como desventaja el medio de propagación de la cepa del hongo ya que necesita muchos controles de temperatura y humedad.

Red bibliométrica “Citaciones Vs Autores”



Figura 4: Red bibliométrica Citaciones Vs Autores
Fuente: Autores

Para la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se realizó un análisis bibliométrico con el programa VOSviewer como se muestra en la Figura 5, Para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta el parámetro relacionado con Incidencia y Palabras claves arrojando como resultado que las palabras claves que más se correlacionan con nuestra ecuación de búsqueda son Biogás con 343 citaciones, Celulosa con 323 citaciones, Lignina con 273 citaciones, Digestión Anaerobia con 123 citaciones y Biomasa 115 citaciones, todas estas palabras claves están conectadas mediante una red de búsqueda, es decir que todas estas se relacionan en la mayoría de los textos investigados.

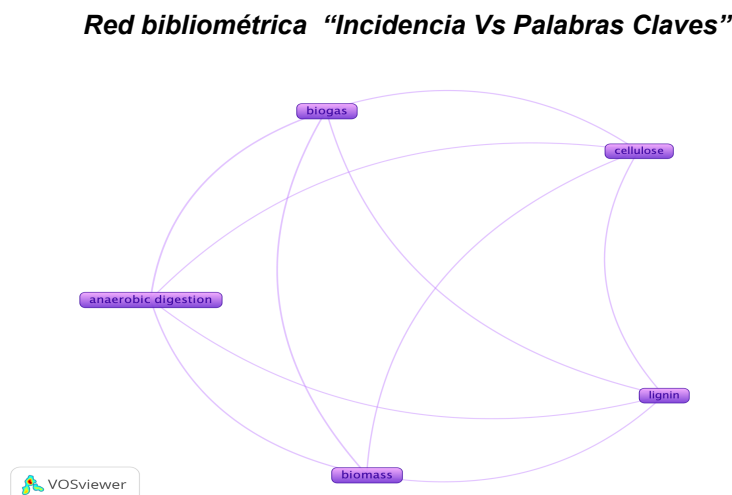


Figura 5: Red bibliométrica Incidencia Vs Palabras Claves
Fuente: Autores

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO EXCEL : Base de datos DOAJ

Ecuación de búsqueda #1: ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas***

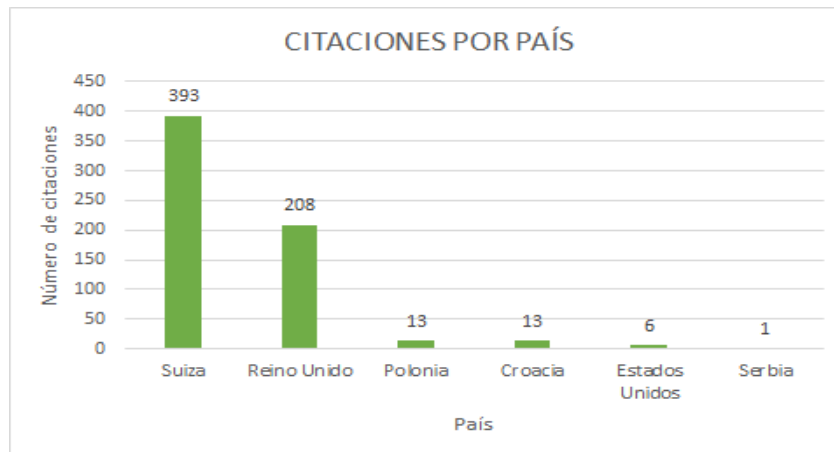
Para la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se realizó un análisis bibliométrico con el software Excel como se muestra en la Gráfica 10. Arrojando como resultado que el país con mayor número de citaciones es **Suiza** con 393, este país propone un pretratamiento para investigar la influencia de la biomasa lignocelulósica triturada y no triturada en la producción de biogás en un reactor. El biorreactor fue alimentado con **Sida hermafrodita** mezclada con estiércol de vaca. Esta tecnología posee un diseño innovador, ya que consta con un mecanismo de mezcla tipo jaula, el cual consta de dos agitadores cilíndricos en forma de jaula. Las jaulas giran simultáneamente alrededor del eje del biorreactor y en contra de sus propios ejes. El biorreactor se presenta actualmente en el marco del programa **Record Biomap** (Horizonte 2020). Este programa tiene como objetivo apoyar una producción de biometano rentable y energéticamente eficiente en aplicaciones a pequeña y mediana escala. El funcionamiento del reactor se realizó con una carga orgánica de Sida hermafrodita de 2 kg / m³ · día y 3 kg / m³ · día y con un tiempo de retención hidráulica de 50 días y 33 días respectivamente. Arrojando como resultado que la comparación entre la biomasa lignocelulósica pretratada bajo la carga de 2 kg / (m³ · día) fue de 680 L / kg [15]. La producción de biogás bajo la carga orgánica de 3 kg VS / (m³ · d) fue de 730 L / kg VS. La trituración de la biomasa fue un factor clave en el aumento del contenido de metano en la producción de biogás. En todos los experimentos, el aumento de producción de biogás fue en razón del 54%.

El segundo país con mayor número de citaciones es **Reino Unido** con 208 citaciones. Este país propone un estudio con **recalcitrancia del abedul** mediante la aplicación de un pretratamiento por explosión de vapor (SE) a 210 °C y con un tiempo de retención de 10 min. Además, se aplicó un bioaumento con la bacteria celulolítica "**Caldicellulosiruptor bescii**" para mejorar la producción de metano a partir de abedul explotado con un proceso de digestión anaeróbica en condiciones termofílicas a 62 °C, este proceso arrojó como resultado el aumento del rendimiento de metano hasta

un 140% mientras que en el pretratamiento con explosión a vapor por sí solo contribuyó a la mayor proporción de mejora del metano de 81 a 179 ml de CH₄ / g de VS arrojando un aumento 118 %. La explosión a vapor como pretratamiento mejora la accesibilidad del material de abedul a las bacterias anaeróbicas [16]. Se ha demostrado que la explosión de vapor da como resultado la eliminación de hemicelulosas, la relocalización de la lignina con alguna modificación estructural junto con fibras rotas y materiales superficiales porosos. Otro estudio de gran importancia para este país basa su investigación en el aprovechamiento de la biomasa **Miscanthus x giganteus**, la cual fue elegida por sus altos rendimientos de biomasa y bajos requisitos de insumos. La accesibilidad a los carbohidratos de esta biomasa lignocelulósica es limitada pero puede mejorarse con un pretratamiento alcalino. La eficiencia del pretratamiento del **Cal** (CaO) con baja adición de agua en el potencial bioquímico de metano (BMP) del miscanto se investigó a través de dos diseños experimentales variando las concentraciones de CaO la cuales oscilaron entre el 2,5% y el 17,5% CaO con un tiempo de retención de 1, 3 o 5 días. El miscanto pretratado posteriormente fue digerido con estiércol de ganado en reactores de lecho de lixiviación seca. Para esta investigación el mayor rendimiento se dio con las concentraciones 5 y 10% de CaO durante un tiempo de retención de 5 días, luego co-digerido con estiércol en reactores de lecho de lixiviación seca arrojando como resultado un aumento de la producción de biogás entre 14-37% del BMP [17].

El siguiente país con mayor número de citaciones es **Croacia** con 13 citaciones, este país propone un tratamiento innovador el cual consiste en el proceso de extrusión, este es un proceso que combina múltiples operaciones, como alto cizallamiento, temperatura (60 a 300 ° C) y presión (hasta 30 MPa). La extrusión provoca la despolimerización de la celulosa, la hemicelulosa, la lignina y las proteínas a veces, también la degradación térmica de azúcares y aminoácidos. En este estudio se evaluaron cinco tipos de biomasa agrícola (paja, pasto fresco, fracción sólida de estiércol y lecho profundo de ganado) para la producción de biogás utilizando extrusión como pretratamiento. La extrusión aceleró la degradación de la mayoría de los compuestos orgánicos, lo que a su vez aumentó el rendimiento de metano entre un 18% y un 70% después de 28 días de EA y entre un 9% y un 28% después de 90 días de EA. La tasa de producción de biogás a partir de materiales extruidos fue más rápida en comparación con los materiales sin tratar [18]. Croacia reconoce el potencial del biogás, pero todavía se utiliza poco en comparación con otros estados de la Unión Europea. En cuanto al potencial de residuos lignocelulósicos, especialmente de estos tres cultivos (maíz, soja y girasol) que son de gran importancia para Croacia, la situación es prometedora. Sin embargo, los métodos que se utilizan como pretratamiento de la biomasa lignocelulósica siguen siendo demasiado caros y no rentables. Todavía están en desarrollo y el objetivo es encontrar tecnologías que protejan y cuiden el medio ambiente y que no sean costosas.

El último país con el mayor número de citaciones es **Estados Unidos** con un total de 6 citaciones, para este caso se estudio la aplicación de una solución de KOH a una concentración de 1,5% y su licor negro (licor gastado de KOH) (BL) para pretratar la estufa de maíz (CS) a una temperatura de 20 °C para mejorar la digestibilidad para la digestión anaeróbica (AD). Los resultados no mostraron diferencias significativas en el contenido promedio ponderado de metano sobre la base de los rendimientos experimentales de metano y biogás entre la estufa de maíz tratada con licor negro y la estufa de maíz original tratada con KOH después de la digestión anaerobia. El proceso de licor negro aumentó significativamente el rendimiento total de metano en un 52,4% en comparación con el estufa de maíz no tratada (135,2 ml/gVS), mientras que no se observó ninguna diferencia significativa entre el rendimiento total de metano del 1,5% tratado con KOH y el CS tratado con BL. Además, el proceso BL ahorró significativamente el consumo de agua y KOH, en un 56,2% y 57,4%, respectivamente, en comparación con el 1,5% de pretratamiento de KOH. Nuestros hallazgos sugieren colectivamente que el reciclaje y la reutilización del licor negro KOH podrían ser un método eficiente para el tratamiento de la biomasa lignocelulósica y tener la capacidad de reducir los costos de los insumos en futuros procesos de AD [19].



Gráfica 10: Número de citaciones por país
Fuente: Autores

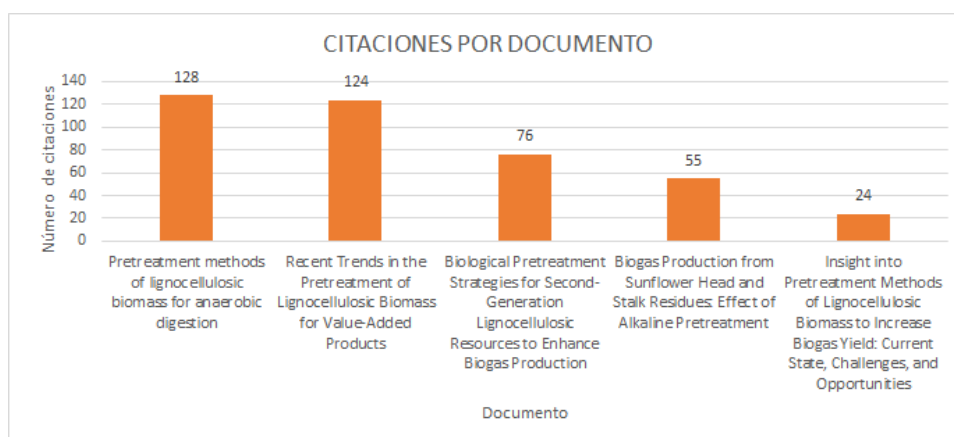
Para la ecuación de búsqueda ***lignocellulosic biomass AND pretreatment AND biogas*** se realizó un análisis bibliométrico con la plataforma Excel como se muestra en la Gráfica 11, Para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta el parámetro relacionado con citaciones y documentos, arrojando como resultado que el documento más citado lleva por nombre ***“Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion”*** con un total de 128 citaciones. Este documento tiene como fin revisar los procesos de pretratamiento utilizados en la producción de biogás a partir de materiales lignocelulósicos, de la misma manera identificar las fortalezas y debilidades de las diversas tecnologías y encontrar un método de pretratamiento adecuado aplicarlo a escala industrial. Se inicia con la explicación de un pretratamiento mecánico, el cual pretende mejorar la efectividad de la bioconversión, la densificación y distribución de partículas, la accesibilidad enzimática y la transformación general de la biomasa lignocelulósica, este pretratamiento ayuda a generar una nueva superficie, mejora las propiedades de flujo y aumenta la densidad aparente y la porosidad de la biomasa. En este pretratamiento se utilizan distintos molinos para descomponer el material lignocelulósico y reducir la cristalinidad del material, entre los molinos de uso común están: de desgaste, de bolas, centrífugos, coloides, de martillos, de cuchillos, de pasadores y vibratorios. Posteriormente se explica el pretratamiento fisicoquímico en el cual se describe la exposición a vapor, durante este pretratamiento el material lignocelulósico se expone a un vapor saturado de alta presión a una temperatura de 160 - 260 °C y a una presión correspondiente de 5-50 atm durante unos minutos, la presión se libera gradualmente y el vapor se expande dentro de la estructura de la biomasa lignocelulósica, haciendo que las fibras individuales se separen y la estructura de la pared celular se interrumpa [20]. Las condiciones más eficientes para este pretratamiento se pueden lograr a baja temperatura y largo tiempo de residencia (190 °C, 10 min) o a alta temperatura y corto tiempo de residencia (270 °C, 1 min). Arrojando como resultado un incremento en la producción de biogás en un 32%.

El siguiente pretratamiento que se explica en el documento lleva por nombre ***“Microwave pretreatment (MWR) where the use of MWR-assisted biomass pretreatments was studied, including MWR/water, MWR/alkali, MWR/acid, MWR/ionic liquid, MWR/salt and other combined MWR-assisted pretreatments.”***. Para dicho estudio se evaluó el rendimiento de este pretratamiento con paja de trigo, se eliminó más hemicelulosa y lignina en un tiempo más corto en comparación con el pretratamiento alcalino tradicional. Se realizó una comparación entre los rendimientos de los pretratamientos combinados arrojando como resultado que el rendimiento máximo para la producción de biogás se obtuvo después del pretratamiento enzimático por MWR/ácido diluido a 0,5% H₂SO₄ a 160 °C durante 10 minutos obteniendo un rendimiento de 650 mg/g de paja, el siguiente pretratamiento con mayor rendimiento fue MWR/alcalino con 0,1 g NaOH/g paja a 160 °C durante 10 minutos, obteniendo un rendimiento de 604 mg/g de paja, por último el tratamiento con mayor rendimiento es MWR/agua a 200 °C durante 10 minutos obteniendo un rendimiento 544 mg/g de paja. Por último se estudia un tratamiento alcalino con NaOH, KOH y Ca(OH)₂ estas son las sustancias químicas más utilizadas en el pretratamiento alcalino, las sustancias NaOH y KOH son los tratamientos alcalinos más eficaces para mejorar la digestibilidad de la biomasa. Arrojando como resultado que el rendimiento de metano de la paja de maíz pretratada con NaOH fue aproximadamente 220 ml/g,

generando un rendimiento de 73,4% sobre la paja de maíz no tratada, la siguiente sustancia química evaluada es KOH la cual es una base sólida, la biomasa pre tratada con KOH genera un rendimiento máximo de metano de 295 ml/g y mejoró significativamente el 95,6% con respecto al biomasa no tratada, por último se evalúa el rendimiento con Ca(OH)_2 el cual podría ser mejor ya que es de bajo costo, más seguro, más respetuoso con el medio ambiente y se puede recuperar fácilmente. La biomasa tratada con Ca(OH)_2 mejora el rendimiento de producción de metano de materiales lignocelulósicos con una producción de 210,71 ml/g mejorando significativamente en 39,7% sobre la biomasa no tratada [21].

El segundo documento con mayor número de citas lleva por nombre “**Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products**” con 124 citas, este documento tiene como objetivo discutir las diversas estrategias de pretratamiento actualmente en uso y proporcionar una visión general de su utilización para el aislamiento de componentes biopoliméricos de alto valor. El artículo discute además las ventajas y desventajas de las diversas metodologías de pretratamiento, así como aborda el papel de varios factores clave que es probable que tengan un impacto significativo en el pretratamiento y digestibilidad de la biomasa lignocelulósica. Uno de los pretratamientos más estudiados es la exposición de CO_2 , el mayor rendimiento para este pretratamiento se hace bajo presión, las moléculas de CO_2 penetran en la biomasa y rompen el nivel más alto de estructuras que comprenden hemicelulosa y lignina. Por otro lado, cuando se libera el gas presurizado, rompe la estructura de matriz compacta de la biomasa, mejorando así la accesibilidad de las fibras de celulosa. Se realizó un estudio sobre el rendimiento del casco de soja el cual fue pretratado con CO_2 supercrítico mostró un alto rendimiento de glucosa del 97% después de la hidrólisis enzimática. Este alto rendimiento de glucosa se obtuvo en condiciones óptimas de presión de pretratamiento de 8 MPa y temperatura de 130 °C durante 30 minutos. Por lo tanto, la presión y la temperatura del pretratamiento también juegan un papel significativo en el tratamiento de CO_2 supercrítico de la misma manera se encontró que el pretratamiento de CO_2 supercrítico de la estufa de maíz (75% de contenido de humedad) en condiciones óptimas de 24 MPa y 150 °C durante 60 minutos, aumentó el rendimiento de glucosa en 2,5 veces en comparación con la estufa de maíz nativa. Un pre tratamiento combinado de mazorca de maíz y tallo de maíz por CO_2 supercrítico y pretratamiento ultrasónico mejoró la producción de biogás en un 75% y un 13,4%, respectivamente, en condiciones óptimas de 20 MPa y 170 °C. Una de las ventajas más significativas son el bajo costo del CO_2 , el bajo impacto ambiental, la no inflamabilidad, la no formación de toxinas y la fácil recuperación hacen que el empleo de CO_2 supercrítico en el pretratamiento de LCB sea un enfoque atractivo. Sin embargo, el insumo económico para la configuración experimental que puede soportar condiciones de alta presión de pretratamiento de CO_2 es significativamente alto y es un gran obstáculo en su aplicación a escala industrial [22].

El último documento con mayor número de citas lleva por nombre “**Biogas production from sunflower head and stalk residues, effect of alkaline pretreatment**” con 55 citas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del pretratamiento alcalino de varias partes de los residuos de girasol (por ejemplo, cabezas y tallos) y su rendimiento de metano. Los datos experimentales mostraron que el pretratamiento en condiciones leves (55 °C; 24 h; 4 g de NaOH 100 g⁻¹ sólidos totales) causó un aumento en el potencial bioquímico de metano (BMP) tanto de las cabezas como de los tallos de los residuos de girasol según lo determinado en las pruebas por lotes. La mayor producción de metano (268,35 ± 0,11 ml de CH_4 g⁻¹ sólidos volátiles) se logró a partir de los residuos de cabeza de girasol pretratados. A partir de entonces, el efecto del pretratamiento alcalino de los residuos de cabeza de girasol se evaluó en modo continuo; utilizando reactores continuos de tanque agitado (CSTR) en dos fases operativas. Durante la primera fase, los CSTR se alimentaron con la fracción líquida producida por el pretratamiento de cabezas de girasol. Durante la segunda fase, los CSTR se alimentaron con toda la suspensión resultante del pretratamiento de cabezas de girasol (es decir, fracciones líquidas y sólidas). En ambas fases operativas, se observó que el pretratamiento alcalino de los residuos de la cabeza de girasol tenía un efecto insignificante (fase I) o incluso negativo en la producción de biogás; lo que era contradictorio con los resultados de las pruebas BMP. Parece que; durante el pretratamiento alcalino; esta parte de los residuos de girasol (cabezas) puede liberar compuestos inhibidores; que inducen un efecto negativo en la producción de biogás a largo plazo (por ejemplo, durante digestores de funcionamiento continuo como CSTR) pero no a corto plazo (por ejemplo, pruebas por lotes) donde el efecto del inóculo puede no permitir que se establezca la inhibición [24].



Gráfica 11: Número de citas por documento
Fuente: Autores

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La información obtenida a través de la revisión bibliográfica nos muestra un avance en las tendencias a nivel mundial en cuando el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica para la producción de biogás, para realizar dicho análisis se tuvo en cuenta los indicadores bibliométricos con el fin de centralizar toda la información, arrojando como resultado que para ecuaciones de búsqueda 1,2,3 y 4 se obtuvieron resultados muy cambiantes debido a que se acota la información. Para el primer indicador bibliométrico se tienen en cuenta las patentes en donde se evidencia las patentes más desarrolladas para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, de la misma manera se presentan datos técnicos que revelan el funcionamiento y las condiciones para la producción de biogás. Como segundo indicador bibliométrico se realiza una discusión teniendo en cuenta los años en lo que se investigó más sobre el tema abordado distintas posibilidades para la investigación del mismo, un tercer indicador bibliométrico son las entidades, compañías que investigan y aportan sobre el tema, el último indicador bibliométrico presenta las tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica mencionado ventajas y desventajas de la mismas.

Discusión para resultados de patentes

Para la ecuación de búsqueda uno, en esta ecuación se analizaron un total de 5 patentes, en donde la más relevante lleva por código **CN105132469A**. Esta patente comprende la combinación de un pretratamiento mecánico y un pretratamiento de fermentación anaeróbica, la materia prima es pulverizada y se agrega a la solución de cultivo de heces de animales a una temperatura de 38 a 42 °C, manteniendo un PH entre 6 y 8, posteriormente se realiza un proceso de aireación en un periodo de 10 a 30 minutos, la concentración de oxígeno disuelto en el proceso de aireación dentro del reactor de pretratamiento no debe exceder 1,5 mg/litro, la concentración excesiva de oxígeno disuelto puede afectar la supervivencia de los microorganismos anaeróbicos y reducir su biomasa y actividad en condiciones anaeróbica, el tiempo de retención hidráulica de pretratamiento es de 12 a 48 horas, luego el líquido de fermentación pretratado se introduce en un reactor de fermentación anaeróbica para la producción de biogás, el tiempo de retención hidráulica del material dentro del reactor de fermentación anaeróbica es inferior a 30 días. Como resultado se obtiene una mejora en la producción de biogás de un 57%. Este pretratamiento posee ciertas ventajas ya puede ser utilizado en la mayoría de la biomasa lignocelulósica y no necesita agregar productos químicos en el proceso, tiene un bajo costo de operación y el tiempo de hidrólisis es corto, la eficiencia es alta y se requiere un tiempo residencia de 1 a 2 días lo que lo hace significativamente corto, por último el líquido de hidrólisis se puede convertir rápidamente en biogás después de entrar en el reactor de fermentación debido a la alta eficiencia del pretratamiento en los procesos de hidrólisis y acidificación como resultado la eficiencia de conversión de biogás mejora en gran medida.

Para la ecuación de búsqueda uno identificó como patente más relevante la que tiene id **CN111394402A**. Esta patente presenta un método para para la coproducción de ácido graso de cadena media y biogás utilizando como materia prima la fibra de la madera, para llevar a cabo este pretratamiento se mezcla la madera triturada con una solución alcalina, luego se realiza una separación sólido-líquido de 1:10- 1:40, una temperatura de 30 a 80°C y un tiempo entre 12 - 48

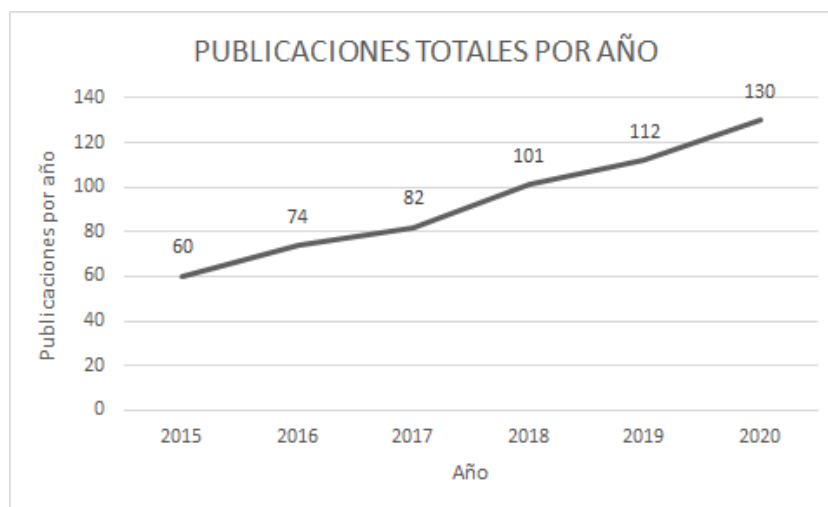
horas, esta tiene como fin obtener el hidrolizado y los residuos sólidos, este producto es mezclado con lodo digerido anaeróbicamente con un pH de 5 a 5.5 y se agrega de 1,5 a 3 g de etanol o ácido láctico a esta mezcla y se obtiene ácido graso de cadena media y el licor de fermentación extraído respectivamente, este es mezclado con los sólidos obtenidos anteriormente y se continúa con la fermentación anaeróbica hasta conseguir producto esperado que es el biogás, el rendimiento de producción del metano es del 50-60%. En cuanto a las ventajas de esta patente se encuentra que esta realiza la coproducción de biogás y ácidos grasos de cadena media, por lo tanto aumentan los tipos de productos y el valor agregado en comparación con el proceso tradicional de fermentación anaeróbica, además de esto se adopta el método biológico para preparar biogás de energía limpia y compuestos de plataforma de ácido carboxílico como el ácido hexanoico, que no solo puede realizar la utilización de energía y recursos de desechos orgánicos como la paja, sino que también utiliza materias primas petroquímicas para preparar los productos.

Para la segunda ecuación de búsqueda se obtuvo que la patente más relevante lleva por código **CN106086081A**. La patente propone un método de pretratamiento de bio-gasificación de paja el cual consiste en una pulverización mecánica de la materia prima esta es pulverizada por un molino de bolas, un molino de vibraciones y un rodillo, con el fin de unificar el tamaño de partículas de materia prima en un rango de 1 mm a 10 mm, posteriormente se realiza un pretratamiento térmico en donde se realiza una explosión a vapor en donde se expone el material lignocelulósico a temperaturas entre 200 y 240°C una presión de 0,69 y 4,83 MPa durante 30s y 20 minutos con el fin de hidrolizar y ablandar la hemicelulosa y la degradar parcialmente la lignina, posteriormente se realiza un proceso de enfriado a temperatura ambiente y la adición de microorganismos de putrefacción blanca, esta adición de microorganismos ayuda a aumentar la tasa de descomposición de la lignina, los microorganismos de pudrición blanca más comúnmente utilizados son *Phanerochaete Chrysosporium* y *Coriolus versicolor*. Como resultado de este pretratamiento se obtiene un aumento en la producción de biogás de un 78%, Las ventajas al realizar este pretratamiento son bajo costo de implementación, bajo consumo de energía y condiciones ambientales suaves sin contaminación

Para la ecuación de búsqueda tres se determina que la patente más relevante de las ... registradas es la que lleva el id **US2020277637A1**. En esta patente se presenta un método que facilita la conversión de los residuos lignocelulósicos en biogás en tanques de tratamiento. En este método la biomasa se somete a dos condiciones de tratamiento diferentes, una es con condiciones anaeróbicas biológicas y altas temperaturas en donde se encuentran microorganismos anaerobios termófilos y otra que se realiza con microorganismos no termófilos. Para el tratamiento realizado en condiciones anaeróbicas biológicas se determina que la optimización en la solubilización y producción de biogás es mucho mayor debido a varios factores como la temperatura constante, la cual se encuentra entre los 75 y 80 °C, el pH, el cual debe estar controlado para que permanezca en un rango de entre 7,5 y 8,5 y el tiempo, el cual puede variar entre las 12 y las 72 horas dependiendo del tipo de microorganismo empleado. Todos estos factores le permiten a los microorganismos mesófilos realizar el proceso de pasteurización y crecimiento al mismo tiempo, lo que hace que el tiempo de producción sea mucho menor y la producción de biogás también aumenta. Mientras que para el pretratamiento realizado en condiciones no termófilas, la temperatura se encuentra entre los 15 y 55 °C, el pH se encuentra siempre controlado en un rango de 6.5 a 8.5 y un tiempo entre las 48 y 72 horas. Como resultado para el primer pretratamiento aplicado a la materia prima, se obtiene que el porcentaje de solubilización de lignina es de 85% y el aumento en la producción de biogás fue de 74 %, mientras que para el segundo se obtuvo un porcentaje de solubilización de 90% y de producción de biogás del 72%. Una de las ventajas de esta invención es que se le pueden realizar muchas modificaciones en el tiempo, las temperaturas y los rangos de pH, así como los microorganismos utilizados, y su enfoque va a ser el mismo.

Por último, se encuentra la cuarta ecuación de búsqueda en la cual se identificó como patente más relevante la que tiene como id **EA026271B1**. Esta patente presenta un método el cual utiliza como materia prima la biomasa lignocelulósica blanda la cual se caracteriza por tener un índice de xilano del 10% debido a que pasa por un pre tratamiento hidrotermal que se encuentra a una temperatura de 120°C y un pH en un rango de 3,5 a 9, luego de esto se mezcla la fracción líquida separada y la fracción sólida hidrolizada, posteriormente se pasa a un reactor anaerobio en donde se adiciona un hongo de podredumbre blanda con el fin de realizar el proceso de fermentación, este proceso arrojó como resultado un aumento del 60% en la producción de biogás. Como desventaja se presenta un aumento en el consumo de energía en el proceso productivo, también requiere un tiempo de retención hidráulico más alto que otros procesos y por esto aumentan los costos de producción.

Discusión para resultados por años



Gráfica 12: Número de publicaciones por año
Fuente: Autores

En la Gráfica 12 se evidencia la tendencia en las publicaciones en los años comprendidos para la investigación, arrojando como resultado que el año con menor número de publicaciones fue el año 2015 con 60 publicaciones, según el boletín 112 de la revista de Bioenergía para este año solo se realizó un aprovechamiento del 13% de todos los residuos a nivel mundial a partir de este año se evidencia un crecimiento en la tasa de aprovechamiento de biogás ya que existe una gran preocupación sobre la sostenibilidad, el medio ambiente y los aspectos sociales (la reducción de gases de efecto invernadero, la biodiversidad, el impacto sobre el suelo y el agua) ya que si no se trata esta problemática adecuadamente se puede presentar importantes barreras para lograr la masificación en el uso de la biomasa. Para el año 2016 las energías renovables proporcionaron un estimado de 19.3% del consumo mundial de energía, se destaca la producción de energía a partir de la biomasa para calefacción y cocina en las áreas rurales en los países en vía de desarrollo con una representación alrededor del 9.1%, una participación del 10.2%. Para el año 2017 hubo un incremento en la cantidad de publicaciones esto se ve reflejado que para este año hubo un incremento de las plantas de biogás alrededor del mundo, en las que se utiliza el metano procedente de la fermentación de residuos orgánicos para producir energía eléctrica y en algunos casos energía térmica para este año hubo un incremento del 12,3% en producción de biogás con respecto al año anterior. Para los años siguientes se produjo un aumento en la cantidad de publicaciones, ya que para estos años se maximizaron los pretratamientos y las nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los residuos y mejorar la producción de biogás, esto se da debido a que se genera una gran problemática de acumulación de residuos agroindustriales y se ve la necesidad de generar un aprovechamiento de los mismos con el fin de generar un valor agregado, de la misma manera los gobiernos juegan un rol fundamental, puesto que pueden mejorar la sostenibilidad de la bioenergía con el establecimiento de criterios apropiados, indicadores, certificaciones y orientación técnica para supervisar su impacto.

Discusión para resultados por entidades



Novozymes es una empresa líder a nivel mundial en enzimas industriales. En los últimos años, la empresa se ha expandido a microorganismos, principalmente para mercados agrícolas. La firma suministra cinco grupos industriales principales: cuidado del hogar, alimentos y bebidas, bioenergía, agricultura y piensos, y técnico y farmacéutico. Sus soluciones biológicas crean valor para

sus clientes al mejorar la eficiencia y el rendimiento, al tiempo que ahorran energía y generan menos residuos. Esta empresa realiza publicaciones sobre el aprovechamiento de la biomasa agroindustrial con el fin de aumentar la solubilidad del sustrato, de la misma manera esta empresa produce enzimas tanto para la extracción de la celulosa como de la hemicelulosa, la enzima hemicelulasa ayuda en combinación con la enzima celulasa a la mejora de la producción de biogás de la misma

manera ayuda a la conversión de tratamientos ácidos y alcalinos. Uno de los proyectos más importantes fue la fabricación de biogás y electricidad a partir la caña de azúcar, este proyecto estuvo asociado con la empresa brasileña Cetrel.



Xyleco es una empresa privada de investigación científica la cual posee una amplia gama de tecnologías innovadoras y patentadas, esta empresa permite que la biomasa no alimentaria y los residuos agrícolas, se utilicen como materia prima para producir limpiamente miles de productos importantes y baratos para la vivienda, la ropa, los alimentos, la medicina, la energía, los materiales y otros artículos necesarios. Esta empresa propone, como parte de esta investigación la empresa Xyleco propone un pre tratamiento efectivo y patentado para la biomasa agroindustrial el cual consiste en reducir el tamaño y la forma de la materia prima ya que este proceso duplica la porosidad y el área de superficie del material de materia prima, mejorando la eficacia de los procesos restantes, seguido a esto se aplican electrones con el fin de reestructurar la materia prima, este proceso es un paso único y patentado el cual tiene como fin la obtención de azúcares a partir de la biomasa reestructurada, por último se le agregan las enzimas las cuales también tienen un patente lo cual acelera el proceso de fermentación y mejora significativamente la producción de biogás.



El INRAE es el nuevo Instituto Nacional de Investigación para la Agricultura, Alimentación y Medio ambiente en Francia. El objetivo del instituto es encontrar soluciones a los desafíos relacionados utilizando la ciencia, la innovación y el apoyo a las políticas públicas con miras a transformar permanentemente la forma en que cultivamos alimentos, producimos alimentos e interactuamos con el medio ambiente. Este instituto es de suma importancia para el rol de investigación ya que propone distintas tecnologías aplicables a la biomasa residual, eliminando una gran problemática de acumulación de los residuos.

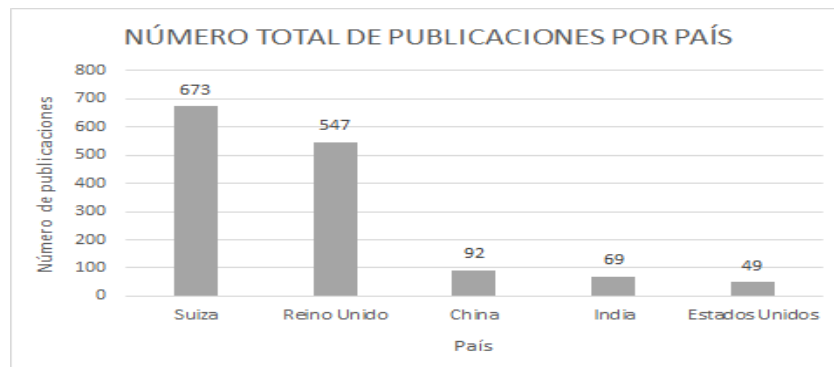


El Centro de Investigación y Desarrollo Agrícola de Ohio (OARDC) es la institución de investigación de la Facultad de Ciencias Alimentarias, Agrícolas y Ambientales de la Universidad Estatal de Ohio. El centro es el hogar de proyectos de investigación que van desde ciencias vegetales y animales hasta ecología humana y medicina, sus proyectos de investigación para la producción de biogás se basan en los pretratamiento fúngicos y digestión anaerobia de la misma manera propone distintas alternativas para la mejora en la producción de biogás aumentando la eficiencia de los biodigestores y de los tiempos de los pretratamientos.



PEI es una empresa de diseño y fabricación especializada en sistemas y equipos de procesamiento de biogás. Esta empresa ha desarrollado la ciencia del procesamiento, tratamiento y utilización del biogás. Desde entonces se ha diseñado y fabricado sistemas de cogeneración de gases residuales totalmente integrados, calderas de gas y sistemas de suministro térmico, sistemas de destrucción de gas y sistemas de manejo de gas para los mercados de vertederos, agrícolas, EDAR municipales e industriales. Esta empresa presenta un rol importante en la investigación ya que propone distintas tecnologías para producción de biogás y la quema del metano. Esta empresa tiene uno de los proyectos más importantes para la trata del material agroindustrial el cual consiste en un sistema de oxidación térmica con un sistemas de deshumidificación del gas, este sistema genera una eliminación de la hemicelulosa, celulosa y siloxano lo que aumenta la producción de biogás.

Discusión para resultados por países



Gráfica 13: Número de publicaciones por año
Fuente: Autores

Como se puede observar en la Gráfica 13, Suiza es uno de los países con más publicaciones, al ser un país en vías de desarrollo tecnológico, los avances realizados para la solución de problemáticas como la producción de residuos sólidos han sido temas de gran interés en los últimos 5 años. Según un informe presentado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en el año 2020, Suiza es uno de los países con la mayor cantidad de producción residuos sólidos, con un total de 705 Kg/año por habitante. Esta problemática latente ha llevado a la investigación de nuevos métodos y tecnologías para la reducción de los posibles impactos. Para el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos, o materia orgánica, se han realizado investigaciones en nuevos métodos que permitan tomar estos residuos y transformarlos en fuentes de energía renovable.

En segundo lugar, se encuentra Reino Unido, este conjunto de países se caracteriza por ser uno de los productores de desechos más grandes a nivel mundial, con un estimado de 26,4 toneladas para el año 2018, y que ha seguido aumentando anualmente. Esta problemática ha sido un impulso para innovar en nuevos métodos y tecnologías para la disminución de residuos sólidos y el aprovechamiento de los mismos. En el año 2016 el Reino Unido implementó el Impuesto de Gas Verde, mediante el cual se plantea eliminar la producción de gases de efecto invernadero para el año 2050. Otra opción utilizada es la investigación en nuevos métodos que faciliten el uso de los residuos orgánicos como fuente de biocombustibles para así aumentar producción de energía a partir de fuentes renovables y ecológicas. Las 547 publicaciones realizadas demuestran el avance que han tenido a nivel tecnológico en la transformación de biomasa para la producción de biogás.

En tercer lugar se encuentra China, este se considera como el país con mayor población a nivel mundial, con un total de 1,439,323,774 habitantes para el año 2020. Junto con esta problemática de sobrepoblación se tiene en cuenta la problemática generada por la excesiva producción de residuos domésticos, ya que tan solo en el año 2017 se registró la cantidad de 190 millones de Ton/año, la cual aumentó junto con el crecimiento de la población, duplicando esta cifra para el año 2020. Como podemos observar, la cantidad de publicaciones en este país no es tan alta en comparación con los anteriormente mencionados, esto se debe a la capacidad de almacenamiento de residuos que posee y la inclinación a los tratamientos convencionales. Al ser el país con la mayor producción de arroz, 210 millones de toneladas en el año 2019, se han venido desarrollando investigaciones enfocadas en el pretratamiento de los residuos orgánicos provenientes de los cultivos y actividades agrícolas con el fin de darles un valor agregado mediante el aprovechamiento para la producción de energía.

En cuarto lugar se encuentra India, el segundo país más poblado a nivel mundial con un total de 1,380,004,385 habitantes en el año 2020. De la misma manera como sucede en China, la sobrepoblación ha sido uno de los factores principales para la generación de grandes cantidades de residuos domésticos, para el año 2020 se estaban produciendo diariamente 100.000 Ton de residuos sólidos, y anualmente el resultado era de 35 millones de toneladas, lo que fomenta el aumento en las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Los avances tecnológicos producto de estas investigaciones han dado como resultado la posibilidad de producir energía y darle un valor agregado a estos residuos.

Por último se encuentra Estados Unidos, que pese a no tener tanta población como los países anteriormente mencionados, es uno de los que más residuos domésticos produce, con un total de 239 millones de Ton/año. Al ser uno de los países más desarrollados del mundo, el consumo

excesivo registrado por gran parte de la población es la clave para la generación de tantos residuos domésticos. Debido a su nivel de desarrollo las tecnologías y métodos investigados para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos presentan gran nivel de avance, lo que permite disminuir la problemática de la acumulación de desechos orgánicos, dando vía a nuevas opciones de aprovechamiento, la más importante es la producción de biogás para suplir la demanda energética que se presenta actualmente.

Discusión para resultados por tecnologías emergentes

Se realizó una recopilación de las tecnologías y pretratamientos aplicables para las 4 ecuaciones de búsqueda en estudio para un periodo de tiempo comprendido entre 2015 y 2020, arrojando como resultado un total de 60 pretratamientos efectivos para la producción de biogás. Estos pretratamientos se clasifican en 4 tipos: alcalinos, biológicos, químicos, mecánicos y fisicoquímicos. De la misma manera se plantean datos técnicos, ventajas y desventajas de los pretratamientos más efectivos

Tratamiento explosión a vapor:

En el presente pretratamiento se obtuvieron cinco resultados de los cuales tres se consideran relevantes debido a su alto porcentaje de eficiencia en la producción de biogás, en primer lugar se presenta un estudio que utiliza como materia prima recalcitrancia de abedul, en este se realiza una explosión a vapor a 210°C y con un tiempo de retención de 10 minutos, para aumentar la digestión anaerobia se utilizó la bacteria celulolítica *C. bescii* en condiciones termófilas a 62°C la cual tuvo como resultado un aumento de 140% en la producción de biogás [17]. El siguiente estudio tomado en cuenta utiliza como materia prima la fibra de maíz, esta es sometida a una explosión de vapor a una concentración 6% de SO₂ a 190°C y durante un tiempo de retención de 10 horas, posteriormente se realiza una digestión anaerobia con hongos dentro de un reactor por 10 días [25], como resultado se obtuvo un aumento del 81% de la producción de biogás lo cual supone una alta efectividad. Por último se presenta un estudio que utiliza como materia prima el bagazo de agave, este es sometido a factores de gravedad entre 2,4 y 3,7 con una presión máxima de 0,98 MPa durante un tiempo de 22 minutos,[26] luego se procede a realizar una bioconversión en lotes anaerobios durante 7 días y como resultado se obtuvo un aumento de 74% en la producción de biogás. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta la eficiencia de producción de biogás se determina que el primer pretratamiento es el más efectivo para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica ya que a diferencia de los pretratamientos 2 y 3 este aumenta su rendimiento ya que utiliza una bacteria termófila se mejora el entorno para el proceso de digestión anaerobia mientras que el tratamiento 2 utiliza como disolvente el SO₂ el cual genera inhibidores, esto repercute en que las bacterias no degradan en su totalidad la materia prima por tanto se generan residuos lo que representa pérdidas en el proceso productivo y disminución en su eficiencia, el tratamiento 3 presenta un proceso ineficiente ya que la materia prima es sometida a cambios drásticos en un tiempo de retención muy corto, esto conlleva a que no haya una ruptura total entre los enlaces de la lignina y la celulosa, debido a esto los microorganismos no pueden acceder a la biomasa e impide que el proceso de digestión anaerobia sea eficiente. Además el primer pretratamiento no implica altos costos de producción debido a que los insumos se encuentran de manera natural a comparación del segundo y el tercer pretratamiento debido a que estos cuentan con la adición de un solvente químico y altos costos en maquinaria respectivamente.

Tratamiento Pretratamiento Alcalino :

Este pretratamiento tuvo 16 resultados de los cuales se consideran relevantes 3, en primer lugar se presenta un estudio en donde se realiza un tratamiento térmico y uno alcalino, en el tratamiento térmico se aumenta la temperatura a 175°C con el fin de solubilizar la celulosa y la lignina y se agrega NaOH a una concentración de 8% con un tiempo de retención hidráulica de 10 minutos para que la biomasa se expanda y mejore la accesibilidad de las bacterias [6]. Posteriormente la biomasa expandida estará más susceptible a una digestión anaeróbica y aumentará un 60% la producción de biogás. En el siguiente estudio se realiza un tratamiento alcalino conjunto de la digestión anaerobia con estiércol de vaca, para este pretratamiento se evaluó la eficiencia de dos disolventes alcalinos como los son NaOH y Ca(OH)₂ en una concentración del 2%, en este pretratamiento se dispone la biomasa en cuatro reactores los cuales permanecen durante un día y cumplen las siguientes condiciones: reactor 1 (NaOH a 35°C), reactor 2 (NaOH a 55°C), reactor 3 (Ca(OH)₂ a 35°C) y reactor 4 (Ca(OH)₂ a 55°C), posteriormente los productos obtenidos son mezclados con estiércol de

vaca en una proporción 1:2 y con agua en una proporción 1:3 con respecto a los reactores durante 10 días [9]. Como resultado se obtuvo que la mayor producción de biogás se generó en el reactor 2 con un total de 54%. Por último se presenta un estudio que utiliza como materia prima la estufa de maíz la cual se dispone en dos reactores, en el primer reactor se pretrata la materia prima con una solución de KOH a una concentración de 1.5%, a una temperatura de 20°C y en el segundo reactor se pretrata la materia prima con una solución de KOH a una concentración de 1.5% y su licor negro a una temperatura de 20°C, esta mezcla pretratada tiene un tiempo de retención de 10 horas [19]. Posteriormente esta mezcla se traslada a un reactor de digestión anaerobia en donde se agregan microorganismos con el fin acelerar la degradación de la biomasa durante 7 días, este estudio arroja como resultado que el proceso mas eficiente fue la mezcla de KOH con el licor negro ya que se obtuvo un aumento del 52,4% en la producción de biogás. En base en lo anterior y teniendo en cuenta la eficiencia de la producción de biogás se determina que el primer tratamiento es el más efectivo para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica ya que a diferencia de los tratamientos 2 y 3 este presenta una solución con una alta concentración y un tiempo de retención hidráulico menor, esto permite que no se desarrollen inhibidores a comparación del pretratamiento 2 en el cual aumenta el tiempo de retención y disminuye la temperatura y la concentración de los disolventes estas condiciones favorecen el entorno para el desarrollo de inhibidores generando pérdidas y afectando la producción de biogás, así mismo el pretratamiento 3 presenta un déficit en la producción de biogás ya que al momento de realizar la mezcla con el licor negro la concentración del disolvente disminuye y requiere de un etapa extra que consiste en agregar microorganismos para degradar los residuos de la mezcla con el fin de aumentar la producción de biogás. En cuanto a costos el pretratamiento más eficaz es el 2 debido a que la concentración del disolvente es baja al igual que la temperatura, además de esto se implementa como técnica de mejora la digestión anaerobia con estiércol de vaca la cual no representa un incremento en los costos de producción de biogás, a diferencia de este el pretratamiento 3 aprovecha los residuos de la solución para aumentar su eficiencia en cuanto a la producción de biogás lo cual no implica un aumento significativo en los costos por último el pretratamiento más costoso es el 1 ya que maneja altas temperaturas y concentraciones.

Tratamiento por Extrusión:

Para este tipo de pretratamientos se obtuvo un total de 6 resultados, de los cuales 2 se consideran relevantes por el aumento en los porcentajes de producción de biogás. El primer pretratamiento proviene de Croacia y tiene un rendimiento del 70%. Este pretratamiento se realiza con el fin de lograr una disminución de entre 15 y 20% de humedad presente en la biomasa y también realizar una degradación en la estructura lignocelulósica, disminuyendo las cantidades presentes de celulosa, hemicelulosa, proteínas y lignina. Este método consiste en la combinación de temperaturas que van desde los 60 hasta los 300° C y presiones hasta de 30 MPa. Como resultado de la aplicación de este pretratamiento a 5 diferentes tipos de residuos lignocelulósicos, se obtuvo un aumento en la velocidad del proceso de degradación, lo que generó aumentos de entre 18 y 70 % en la producción de metano luego de un periodo de tiempo de 28 días en comparación a los residuos sin tratamiento previo [18]. El segundo pretratamiento proviene de India y presenta un aumento en la efectividad del 54%. Este pretratamiento consiste en la combinación de bagazo de caña con estiércol de vaca. Primero se realizó un secado previo del material lignocelulósico durante un lapso de tiempo de 2 días para disminuir la cantidad de humedad presente. Posteriormente fue sometido a un proceso de molienda en donde el resultado obtenido fueron partículas con un tamaño promedio de 0.1 a 2 mm. Luego de esto se le aplicó un pretratamiento de tipo alcalino, en donde se utilizaron varios compuestos químicos como NaOH al 5% (p / v) y Ca (OH) al 2% (p / v) y una vez tratado se dejó en reposo durante 1 día a temperatura ambiente. Como resultado se obtuvo que los valores de pH para el bagazo pretratado con NaOH fueron de 10,2 mientras que el pretratado con Ca(OH) fue de 7,0 y su aumento en la producción de biogás fue entre 48 y 54%. Se puede evidenciar que el primer pretratamiento es la mejor opción debido a que no es necesaria la aplicación de agentes externos como los compuestos alcalinos externos, lo que ayuda a la disminución de los costos y la eficiencia era mucho mayor [27]. El déficit que se puede observar al comparar los porcentajes puede estar relacionado con el tiempo en que los microorganismos presentes en el excremento de vaca se adaptan a las soluciones alcalinas para realizar la digestión, caso contrario para el primer pretratamiento, en donde solo se necesita el efecto de la temperatura, el cual reduce la dureza de la estructura de la lignocelulosa y la presión aplicada se encarga de la ruptura reduciendo los porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa en mayores porcentajes optimizando la digestión, lo que significa que es más efectiva resultando en un aumento en el porcentaje de biogás.

Tratamientos Químicos :

Como resultado para los pretratamientos químicos se obtuvo un total de 16 resultados, de los cuales solo 5 fueron considerados como relevantes por sus altos porcentajes en la producción de biogás. El primer pretratamiento, de origen suizo, pretende lograr una transformación de los residuos lignocelulósicos en azúcares que puedan ser fermentados para la producción de biogás, mediante el uso de un proceso de hidrólisis enzimática combinada con una digestión producida por hongos. El primer paso consiste en someter la materia prima a un proceso de trituración hasta obtener partículas con tamaños similares a los 15 mm, para luego ser esterilizada por medio de una aplicación de vapor a alta presión y por último se le agrega agua como forma de preparación para combinarla con el pretratamiento fúngico, el cual necesita una cantidad de humedad del 75%. El pretratamiento fúngico se realiza por aparte antes de ser agregado a los residuos lignocelulósicos. En unos biorreactores de lecho plano se realiza la inoculación de los residuos lignocelulósicos seleccionados con el cultivo de hongos y se mantiene a una temperatura constante de 28 °C [22]. Una vez aplicado el pretratamiento fúngico la biomasa es trasladada hacia los reactores donde se lleva a cabo el proceso de hidrólisis enzimática. Una vez el proceso de pretratamiento combinado está completo se determina que los residuos sometidos a este proceso presentan un aumento en la eficiencia de 90% en comparación a los residuos sin pretratar.

El siguiente pretratamiento utiliza la paja de trigo como materia prima debido a su potencial para la generación de biogás. Como primer paso los residuos son ingresados a un molino para disminuir su tamaño a partículas de aproximadamente 12 m, a las cuales se les agrega una solución de Na_2CO_3 en tres concentraciones distintas, 3% (0,28 mol / L), 5% (0,47 mol / L) y 7% (0,66 mol / L) y se mantienen con un contenido de humedad de 88%. Posteriormente se toman grupos de materia prima mezclados con Na_2CO_3 y se realiza un proceso de incubación durante 4 días a temperatura constante de 20 ± 1 °C, luego son sometidos a pretratamiento durante 6 días más para finalmente pasar a un proceso de secado, el cual tiene una duración de 2 días y es realizado en un horno que se mantiene a una temperatura constante de 6 °C [10]. Como resultado se obtiene que luego de los 6 días de pretratamiento, la cantidad de celulosa se reduce en un 59, 2%, la hemicelulosa en 48,5% y la lignina en 35,9%, lo que genera un aumento de $\pm 80\%$ en la producción de biogás en comparación a residuos lignocelulósicos sin tratamiento. Para el siguiente pretratamiento se utiliza la hidrólisis enzimática como medio para lograr la ruptura en la estructura de los residuos lignocelulósicos. Como primer paso se cargan 15 gramos de residuos lignocelulósicos en el reactor y se le adicionan 95 ml de una solución de Ácido Sulfúrico en concentraciones de 0,8%, 1,2% y 2,0% dependiendo de cual sea la que se necesite durante un periodo de tiempo de 1 hora [11]. Como resultado se obtiene que la reducción en el contenido de hemicelulosa es del 22,54% y de celulosa en un 56,53%, lo cual permite que el porcentaje de eficiencia en la producción de biogás sea de $\pm 70\%$.

El último pretratamiento se realiza mediante la aplicación de una mezcla de ceniza de cáscara de plátano y lima, la cual es aplicada a varias muestras de materia prima, en este caso residuos de paja de arroz y tallo de maíz, para luego ser sometidas a un tratamiento térmico que termina el proceso de digestión anaeróbica. La fabricación del pretratamiento químico se realizó mediante un proceso de mezcla de varios componentes, primero se mezclan 2 litros de agua destilada con 20 gramos de cáscara de plátano y 10 gramos de lima y se deja en reposo durante un lapso de tiempo de 7 días, en donde la solución estabiliza sus niveles de pH a un valor promedio de 7,7. Para el pretratamiento térmico, el cual se realiza aparte, ambos tipos de residuos lignocelulósicos fueron sometidos a temperaturas de 60 ° C, 75 ° C y 90 °C en periodos de tiempo correspondientes a 2, 6 y 10 horas.[28] Una vez son pre tratados, los residuos son introducidos en un reactor anaeróbico para ser comparados con los resultados obtenidos a partir de otro reactor con residuos sin ningún pretratamiento, este proceso tiene una duración de 50 días y se realiza a una temperatura de 37 ± 2 ° C. Como resultado para la paja de arroz se obtuvo una disminución en el contenido de lignina de 47,01% para residuos con pretratamiento y 18,8% para residuos sin tratar, así como en la celulosa, cuyos resultados fueron 16,67% con pretratamiento y 1,46% sin pretratar y para la hemicelulosa, cuyos porcentajes fueron de 8,48% y 33,05% respectivamente. Esta disminución da como resultado un aumento en el porcentaje de eficiencia, aumentando a un 66%.

Teniendo en cuenta lo anterior se determina que el pretratamiento con mayor efectividad en la producción de biogás es el primero debido a la combinación de temperaturas y presiones, lo cual permite una ruptura más efectiva de la estructura lignocelulósica, así como una disminución en el porcentaje de humedad, la cual puede impedir la digestión anaeróbica. En términos económicos, la mejor opción es el primer pretratamiento, ya que los procedimientos relacionados con cultivos fúngicos se caracterizan por ser mucho más económicos a la hora de implementarlos en comparación con los demás, en donde es necesaria la aplicación de ácidos diluidos y químicos para el desarrollo del pretratamiento. Otra opción viable es el cuarto pretratamiento, ya que en donde es necesario el uso de componentes químicos externos, lo cual puede aumentar los costos de manera considerable. También se determina que las temperaturas registradas en el tercer pretratamiento ayudan a realizar una rápida digestión de la biomasa, en comparación con el cuarto, en donde las temperaturas registradas son más bajas, pero el tiempo de desarrollo es mucho mayor, esto debido al aumento en el efecto corrosivo del ácido sulfúrico cuando es sometido a un aumento de temperatura. De la misma manera se determina un déficit en la producción de biogás del cuarto pretratamiento, ya que el pretratamiento aplicado es completamente orgánico, en comparación con el segundo y tercero, en donde la aplicación de pretratamientos con líquidos alcalinos favorece el proceso de digestión.

Tratamientos Biológicos:

Para este tipo de pretratamientos se obtuvo un total de 11 resultados, de los cuales 4 se consideran relevantes por el aumento en los porcentajes de producción de biogás. En el primer estudio se presenta un pretratamiento que utiliza como materia prima las astillas de abedul, en primer lugar se retira la humedad para facilitar la molienda y obtener un tamaño de partícula de 6 mm, luego se realiza un pretratamiento de explosión de vapor a una temperatura de 210°C y un tiempo de residencia de 10 min y el producto de este proceso fue almacenado en bolsas plásticas a una temperatura de 4°C. El abedul pretratado se sometió a una hidrólisis enzimática utilizando un carga de 5 mg/g de sustrato Cellic CTec , para una condición óptima se requiere ajustar el pH a 5,0 con tampón de acetato, después se llevó a cabo un proceso de incubación a una velocidad de 130 rpm y a una temperatura de 50°C durante 72 horas, esta reacción enzimática se detuvo mediante la desactivación por calor a 100°C durante 10 minutos, esta mezcla se centrifugó durante 5 minutos para obtener el sólido de interés, el cual pasa a la etapa de lavado y secado con agua desionizada a una temperatura de 50°C respectivamente, posteriormente se coloca el sustrato en bolsas de nylon con un tamaño de poro de 25 micras lo que permite un intercambio entre microbios anaeróbicos y el sustrato, luego se llenaron las bolsas de nylon con 1 g de sustrato, se sellaron con calor y se agregaron en frascos que contienen un inóculo en un medio anaerobio, por último las muestras se disponen en un agitador a 37°C durante 39 días. Como resultado se obtuvo un aumento en la producción de biogás de 98,9%, teniendo en cuenta que la base de producción de materia prima sin tratar fue de 257 ml/g. [30]

Para el segundo pretratamiento se utilizan como materia prima los residuos de maíz, hierba y estufa de maíz, antes del pretratamiento se realiza un proceso de maduración de la materia prima mediante un almacenamiento de 5 días antes de ser procesadas, posteriormente la materia prima ingresa a un molino de martillos con una pantalla de 50,8 mm en donde se realiza un pretratamiento mecánico para la reducción de las partículas a un tamaño menor a 15 mm, una vez reducida la materia prima, se agrega agua con el fin de ajustar el porcentaje de humedad inicial el cual es de 75%. Para el desarrollo del pre tratamiento fúngico se utilizaron reactores de lecho envasado, ya que estos son los más comunes para lograr la fermentación aeróbica de la materia lignocelulósica en estado sólido al usar microorganismos que son susceptibles a condiciones de estrés como lo es el cizallamiento. El siguiente paso consiste en realizar la inoculación de la materia prima con micelio fúngico el cual fue producido en un fermentador de elevación aérea a partir de cultivos líquidos, en el desarrollo de este pre tratamiento fúngico es necesario mantener una temperatura constante de 28 °C en el biorreactor de lecho envasado como el fermentador de elevación aérea, además se requiere un sistema de aireación mecánica de 0,01 vvm para poder satisfacer la demanda de oxígeno durante la deslignificación de la biomasa, esto ayuda a la disminución de las altas temperaturas generadas por el metabolismo de los hongos de pudrición blanca, luego de un tiempo de residencia de 28 días.[13] una vez realizado el pretratamiento fúngico la materia prima pasa a un proceso de hidrólisis enzimática. El último paso es la sacarificación enzimática, la cual se desarrolla mediante el uso de hidrolasas comerciales a una concentración de 20 g de proteína/kg de celulosa, además de esto se tienen en cuenta otros factores como el pH que debe ser aproximadamente de 4,8, la temperatura en

un rango de 46 a 51 °C, las condiciones de los equipos los cuales no deben presentar inicios de corrosividad y por último un tiempo de retención de 72 horas. Como resultado se obtuvo un incremento en la producción de biogás en un 90% con base en los 1245 ml de biogás iniciales.

En el tercer pretratamiento se utilizó almidón de yuca como materia prima, la cual fue sometida a un pretratamiento mecánico con el fin de generar una disminución de tamaño para obtener partículas con área menor a 1 cm², posteriormente se mezcla la materia prima con agua, creando solución acuosa. Una vez creada la solución, esta es distribuida en dos reactores diferentes. Antes de agregar la solución, se realiza un pretratamiento térmico a 10 °C grados durante 30 minutos con el fin de inhibir el desarrollo de patógenos para el correcto desempeño de los reactores. El primer reactor está fabricado en acero inoxidable y tiene una capacidad de 3,8 L, en este se realiza un proceso acidogénico de forma semicontinua y cuenta con un sistema de agitación, que funciona cada dos horas durante 10 minutos a una velocidad promedio de 50 rpm con el fin de optimizar el acceso de los microorganismos y homogeneizar la mezcla. El segundo reactor está fabricado en PVC, se caracteriza por ser un modelo tubular sin mezcla y cuenta con un volumen útil de 10 L. En este reactor se realiza un proceso metanogénico. Para el óptimo desarrollo de los pretratamientos es necesario que ambos reactores se encuentren a una temperatura de 37 °C, lo cual se logra mediante la aplicación de una corriente de vapor proveniente de una caldera pirotubular. Para este pretratamiento es necesario mantener un pH promedio entre 5 - 6 lo cual se verifica mediante el método de titulación; cuando el pH presenta alcalinidad se controla mediante la aplicación de 0,5 ml de H₂SO₄, y cuando presenta acidez, se controla aplicando Bicarbonato de Sodio. Posteriormente se agrega el inóculo de estiércol de cerdo en concentraciones de 8, 10, 12 y 14 g/L en cada uno de los reactores por un tiempo de retención hidráulico de 5 días para el reactor acidogénico y 20 días para el reactor metanogénico[31], en donde la producción de biogás de ambos reactores es cuantificada diariamente mediante una metodología de desplazamiento vertical de gasómetros. Como resultado se obtuvo que la mayor producción de biogás en el reactor acidogénico se dio con una concentración de 10 g/L con una producción de biogás de 311,7 ml o un porcentaje de 29,3% y para el reactor metanogénico la mayor producción se dio con una concentración 10 g/L 1047 ml de biogás o un porcentaje del 76,6%.

Por último se implementa un proceso de torrefacción, en el cual se utiliza un reactor de pirólisis con una tubería de gas y un condensador. El reactor de pirólisis se alimenta con 80 g de crudo, la materia prima se dispone en un tubo cilíndrico de 142 mm de largo con un diámetro exterior de 60 mm y un espesor de pared de 1,5 mm, la tubería de gas conecta el reactor de pirólisis con el condensador. El condensador está hecho de un tubo cilíndrico de acero inoxidable de 250 mm de longitud con un diámetro exterior de 48 mm y un espesor de pared de 2 mm y este tiene como fin recolectar el líquido de pirólisis. Se inicia el pretratamiento con una velocidad de calentamiento de 4°C/min hasta llegar a una temperatura extrema de 220 y 300 °C, después de alcanzar dicha temperatura se mantiene la materia prima bajo estas condiciones durante 20 minutos con fin de generar gases condensables, posteriormente se mide el rendimiento volumétrico de los gases con el fin de determinar su composición y su poder calorífico. Los gases que no alcanzan a condensar son llevados a un intercambiador de calor en donde se mezclan gases calientes con una corriente de agua fría a una temperatura de 10°C, una vez disminuida la temperatura de los gases estos pasan por un caudalímetro para indicar la cantidad de flujo, luego pasa a un gasificador para aumentar su poder calorífico. Como resultado se obtuvo que la corriente con el gas condensado generó una producción de biogás 1391 ml es decir un aumento del 43,8% con respecto al gas no condensado [32].

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta la eficiencia de producción de biogás se determina que el primer tratamiento es el más efectivo para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica ya que la combinación de los tratamientos previos a la digestión anaerobia permite una mejora en las condiciones que favorecen un aumento en la producción de biogás, además de esto se emplea una enzima con el fin de mantener las condiciones óptimas dentro del reactor, una de las ventajas más significativas de este pretratamiento es que aplica el método de bolsas de nylon para la producción de biogás, este método es muy efectivo ya que degrada el sustrato en su totalidad a diferencia del tratamiento 2 que a pesar de tener un proceso de producción de biogás similar, este somete las bacterias a un estrés de cizallamiento disminuyendo su rendimiento en un 8%. En cuanto a los tratamientos menos eficientes se encuentra el tratamiento 3 y 4, el primero de estos maneja un proceso productivo de dos reactores acidogénicos y metanogénicos los cuales representan condiciones ineficientes debido a que proponen mantener una temperatura constante en los dos tanques aumentando la cantidad de sustrato para la producción de biogás generando un mayor costo

de producción y disminuyendo el rendimiento en un 22,3%, el tratamiento 4 a pesar de ser innovador en cuanto al proceso, maneja un rango de temperaturas extremas e implementa maquinaria con un rendimiento establecido lo cual genera una limitación en la producción de biogás. En cuanto a costos se encontró que el pretratamiento más económico es el número 3 ya que cuenta con poca adquisición de tecnología y no implementa catalizadores para el aumento en la producción de biogás, seguido por pretratamiento 4 el cual a pesar de tener una inversión inicial alta no requiere de gastos extras para su proceso productivo a diferencia de los pretratamientos 1 y 2 los cuales poseen un alto costo de operación y requieren de una inversión extra para la adquisición de enzimas y catalizadores.

Tratamientos de innovación :

En el primer pre tratamiento se evaluó la implementación de estrategias de cavitación ultrasónica e hidrodinámica para la producción de biogás a partir de residuos lignocelulósicos. Como materia prima se utilizó el estiércol de ganado mezclado con residuos de paja de trigo. Esta mezcla luego fue diluida en purín de ganado para lograr un porcentaje de humedad óptimo del 95%, en donde el estiércol y paja de maíz fueron mezclados en una proporción de 1:1 p/p, mientras que el purín fue añadido en una proporción de 0,20 m³/d. La tasa de recirculación del digestato para lograr una hidratación adecuada fue del 200 %. Para poder aplicar los pre tratamientos de cavitación la materia prima fue transportada hacia un tanque de preparación de sustratos con una capacidad de 2,5 m³ de volumen, en donde la solución de estiércol de vaca fue calentada mediante el paso de agua caliente a través de unos serpentines ubicados en las paredes internas del tanque. Para el correcto desarrollo de los pretratamientos era necesario mantener una temperatura constante de 35 °C, esto se logró utilizando un sistema de control de temperatura y cubriendo el tanque con un aislante de lana de 10 cm de grosor. La alimentación de este tanque se realizó una vez al día, la mezcla de estiércol de ganado y residuo de paja se agregó de manera manual y el purín fue bombeado durante 10 minutos. Esta solución fue agitada de manera constante con la ayuda de un agitador vertical que giraba a una velocidad de 20 rpm durante un lapso de 6,4 días. Posteriormente la materia prima fue sometida a un proceso mecánico de molienda para poder disminuirla a un tamaño de partícula de 2 mm y luego transportada mediante bombeo semicontinuo hacia un tanque de fermentación, en donde la alimentación diaria era de 0,39 m³/d y el pH siempre estuvo entre 6,5 y 7,6. Este tanque de fermentación estaba hecho de poliéster con una altura de 3,4 m y un diámetro de 2,4 m donde el volumen útil era de 23,6 m³ y su funcionamiento era semicontinuo, con alimentación y vaciado secuenciales. Una vez era producido el biogás, este se retenía en la parte superior del tanque, la cual permitía almacenar una cantidad de 2,7 m³ y cuando este se llenaba, el biogás se drena a través una tubería de acero inoxidable conectada a una válvula que permitía extraer cantidades determinadas para purificarlo y quemarlo, mientras que al mismo tiempo se medía el volumen de forma continua utilizando un medidor de gas tipo fuelle. El tiempo total de pretratamiento de la materia orgánica fue de 53,6 días con una tasa de carga orgánica de 2,0 kg VS / m³ ·D. La aplicación del pretratamiento ultrasónico fue realizada en 5 secciones de forma cilíndrica y tubular, cada una de ellas contaba con una capacidad de 8 L, en donde se realizó la instalación por sección de un equipo de ultrasonido con 10 kW de potencia y 24 kHz de frecuencia, mientras que para la aplicación del pretratamiento por cavitación hidrodinámica se ubicó una bomba hipersónica en un tanque con capacidad útil de 25 L que contaba con un rotor ubicado en el centro, el cual giraba a 2800 rpm. La materia prima ingresaba a este tanque por la parte inferior, luego subía hasta llegar al rotor, en donde la fuerza centrífuga producida generaba áreas de vacío debido a la turbulencia generada, lo que resultaba en cavitación, luego de esto era extraída por la parte superior del tanque. Como resultado se obtuvo que la aplicación del pre tratamiento de cavitación hidrodinámica tuvo una productividad de biogás de 430 L/kg VS o 16,5%, mientras que el pretratamiento ultrasónico tuvo una productividad de biogás de 460 L/kg VS o 24,6% [29].

En el segundo pretratamiento se utiliza una serie de diferentes residuos lignocelulósicos como la cebada, el trigo de primavera, el trigo de invierno y la paja de avena. El primer paso fue el almacenamiento de la materia prima a temperatura ambiente antes de la aplicación del pretratamiento de microondas, esto con el fin de reducir el porcentaje de humedad para luego poder disminuir el tamaño de las hebras de paja. Esta disminución fue realizada en un molino de cuchillas a una velocidad de 2000 rpm durante 3 minutos. Una vez el material estuvo completamente molido fue mezclado a mano durante 10 minutos en contenedores plásticos y almacenado para su posterior uso. Para la aplicación del pretratamiento por microondas se utilizó un horno de asfalto CEM Microwave con una salida de 15 amperios y una alimentación de 50 Hz para 220-240 V. Para poder realizar las mediciones del efecto térmico del microondas fue necesario utilizar un sensor termopar previamente

calibrado, el cual registró una velocidad de calentamiento de 5 °C por minuto por cada 100 g de material molido sometido a temperaturas de 200 y 300 °C durante un tiempo de 15 minutos. Luego de la aplicación del tratamiento el material se dejó secar durante 3 horas y posteriormente fue sometido a un proceso de digestión anaerobia en donde 66 reactores de 1125 ml se hicieron trabajar por triplicado con la misma carga orgánica, tiempo de retención y condiciones de incubación. Para esto se utilizó un inóculo de estiércol de ganado, el cual fue pre incubado a $37 \pm 0,5$ °C durante las 2 semanas previas a la inoculación, este inóculo dio como resultado valores de conductividad, pH y salinidad, los cuales fueron $23,4 \pm 0,1$, $7,44 \pm 0,1$ y $16,05 \pm 0,07$, respectivamente. Luego se agregó la inoculación diluida en una proporción de 700 ml, aproximadamente 6 g VS/l cada uno de los sustratos de paja pretratados y se dejó reposando en un reactor durante 8 días. Como resultado se obtuvo que la producción de biogás se vio afectada al aplicar el tratamiento de ondas, ya que se vio reducido un 31% en comparación con los residuos lignocelulósicos no tratados [15].

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se pueda determinar que el primer pretratamiento tiene una tasa de producción más efectiva en comparación con el segundo pretratamiento, en donde la aplicación de microondas genera un déficit en el porcentaje final. Este déficit puede deberse a que el impacto de las microondas no es tan efectivo en la ruptura de la estructura lignocelulósica como lo es en el pretratamiento ultrasónico. Al comparar el pre tratamiento ultrasónico con el hidrodinámico se determina que aunque el tiempo de retención es mayor en este último, la eficiencia en la ruptura de la estructura del ultrasonico benéfica la producción de biogás, ya que genera una producción en L/Kg menor, pero un porcentaje de eficiencia mayor.

Matriz DOFA para Colombia

En en Anexo 4 se presenta un análisis DOFA para Colombia, a nivel nacional Colombia cuenta con muchas oportunidades ya que produce aproximadamente 14 millones de toneladas/año de residuos agrícolas, para el año 2020 solo se aprovecharon un 18% de estos residuos, se espera que para el año en curso se registre un incremento en el aprovechamiento de los residuos. Una de las desventajas a nivel nacional es la falta de recursos destinados a la investigación e implementación de tecnologías o pretratamientos para el aprovechamiento de la biomasa, así como la falta de presencia de entidades o bioindustrias encargadas de promover, financiar y apoyar este tipo de investigaciones. Cabe resaltar que Colombia es un país con las fuentes adecuadas para la implementación de proyectos de innovación en cuanto a materia de energías renovables se refiere, pero estas, en especial la producción de biogás, no ha sido bien recibida. Esta tecnología puede ser de gran importancia, ya que las posibilidades de reducir costos energéticos en áreas rurales son bastante altas.

Conclusiones

- Se concluye que la combinación entre un pretratamiento biológico y un pretratamiento mecánico genera una mayor eficiencia en el rendimiento de la producción de biogás ya que al realizar un tratamiento mecánico se genera una disminución en el tamaño de la biomasa lo cual favorece la accesibilidad de los microorganismo para realizar de manera eficiente la digestión anaeróbica, así mismo este pretratamiento es altamente eficiente ya que emplea una enzima sintética lo cual ayuda a degradar la biomasa de una forma más sencilla evitando que los microorganismos estén sometidos a un estrés por cizallamiento, de la misma manera se evidencia que el microorganismo más adaptable y más utilizado para dicho pretratamiento es una cepa bacteriana que lleva por nombre C. Bezy. Las desventajas más significativas de este pretratamiento son los costos de adquisición de materiales y tecnologías ya que al ser un pre tratamiento tan efectivo se necesita tener controladas muchas condiciones del entorno como por ejemplo pH, temperatura y concentraciones en medio ácido y base, otra de las desventajas importantes en estos pretratamientos son los largos periodos de retención hidráulica los cuales tienen un promedio de 30 a 40 días por cada uno de los reactores, no obstante es un tratamiento altamente eficiente para la degradación y la producción de biogás. Como mejora para disminuir los tiempos de retención se propone un método de bolsas de nylon, lo que se pretende con este proceso es disminuir la cantidad de biomasa a pretratar y colocarlas en el mismo medio de inoculación de los microorganismos.

- Se concluye que uno de los pretratamientos más comunes es la combinación entre mecánico y alcalino, el tratamiento mecánico busca disminuir el tamaño y aumentar la porosidad y accesibilidad y el pretratamiento alcalino busca la expansión y ruptura de los enlaces de la biomasa para que las bacterias puedan realizar de manera más efectiva la digestión anaerobia, en algunos casos para mejorar la digestión anaerobia es mezclado con estiércol de vaca o de cerdo con el fin de aumentar la concentración en el proceso de producción de biogás, este pretratamiento tiene una producción promedio de biogás entre 30 y 50 %. Una de las ventajas de estos pretratamientos es que son relativamente económicos y sus tiempos de retención son muy cortos aproximadamente de 1 a 10 días dependiendo del material, cabe resaltar que dicho pretratamiento es altamente efectivo para cualquier tipo de biomasa lignocelulósica. Este pretratamiento solo genera costos energéticos los cuales se ven reflejados en el proceso de disminución de tamaño, no obstante una problemática de este pretratamiento está asociada a los daños medioambientales por el uso de productos nocivos para el ambiente como lo son NaOH y KOH
- El tratamiento más eficiente para la producción de biogás es uno combinado entre uno mecánico, explosión a vapor y digestión anaerobia, el cual tiene un rendimiento promedio de 140%. Su efectividad se basa en sus bajos tiempos de retención y en la implementación de un hongo de pudrición blanco para el proceso de digestión anaerobia. Este pretratamiento genera grandes costos energéticos pero se compensa con la alta producción de biogás
- Se puede concluir que Suiza y Reino Unido son los países con mayor interés en la investigación e implementación de nuevos métodos de aprovechamiento de residuos para la generación de energía, esto debido a que son los más desarrollados y pertenecen a un programa gubernamental enfocado en la eliminación de los gases de efecto invernadero para el año 2050, en comparación con China, India y Estados Unidos en donde lo principal es disminuir la problemática de producción de residuos además del uso de fuentes no renovables, por lo cual no están enfocados en la producción de nuevas tecnologías.
- Como conclusión se determina que las compañías biotecnológicas más comprometidas con el desarrollo de investigaciones y métodos para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos son Novozymes y Xyleco. La primera compañía es líder en la producción de enzimas sintéticas, las cuales son utilizadas en los procesos de digestión anaerobias con el fin de mejorar la producción de biogás y no someter a las bacterias un estrés dentro del tratamiento, la segunda compañía está enfocada en proponer nuevos pretratamientos y mejorar los pretratamientos y tecnologías ya existentes con el fin hacerlas más eficientes a la hora de aprovechar los residuos.
- Como conclusión se evidencia que en el año 2020 la cantidad de publicaciones aumenta de manera considerable, esto puede deberse al valor agregado que se le ha otorgado a los residuos de tipo lignocelulósico durante los últimos años, ya que las investigaciones realizadas han dado buenos resultados en cuanto a la producción de energía alternativa para satisfacer la demanda actual.

Bibliografía

- [1] D. Lili, R. Nanqi, and C. Guangli, "Biogas slurry pretreatment method of lignocellulosic biomass and method for producing biogas," *Espacenet*, 19-May-2020. [Online]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070618404/publication/CN111172198A?q=CN111172198A>. [Accessed: 14-May-2021].
- [2] (Z. T. AANDERUD, C. L. HANSEN, J. C. HANSEN, and L. D. HANSEN, "Microbial pretreatment for conversion of biomass into biogas," *Espacenet*, 02-Jul-2020. [Online]. Available:

- <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/066539155/publication/AU2018370156A1?q=AU2018370156A1>. [Accessed: 14-May-2021].
- [3] L. Xuyuan and W. Mingming, "Method for using lignocellulose to produce biogas," *Espacenet*, 09-Dec-2015. [Online]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054718037/publication/CN105132469A?q=C N105132469A>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [4] K. Xiaoying, L. Lianhua, S. Yongming, W. Zhongming, X. Tao, and Z. Feng, "Method for co-production of medium-chain fatty acid and biogas by using wood fiber raw material," *Espacenet*, 10-Jul-2020. [Online]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/071427185/publication/CN111394402A?q=CN 111394402A>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [5] X. Haipeng, C. Lei, H. Dongliang, J. Fuqiang, L. I. Yan, and L. Xiaohui, "Method for enhancing efficiency of producing biogas from straw by pretreatment of green liquor," *espacenet*, 28-Aug-2020. [Online]. Available: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/072184346/publication/CN111593076A?q=CN 111593076A>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [6] Y. Xue, Q. Li, Y. Gu, H. Yu, Y. Zhang, and X. Zhou, "Improving biodegradability and biogas production of miscanthus using a combination of hydrothermal and alkaline pretreatment," *Industrial Crops and Products*, 25-Dec-2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669019309951>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [7] M. Li, B. Si, Y. Zhang, J. Watson, and A. Aierzhati, "Reduce recalcitrance of cornstalk using post-hydrothermal liquefaction wastewater pretreatment," *Bioresource Technology*, 23-Jan-2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852419301191>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [8] S. N. Malik, K. Madhu, V. A. Mhaisalkar, A. N. Vaidya, and S. N. Mudliar, "Pretreatment of yard waste using advanced oxidation processes for enhanced biogas production," *Biomass and Bioenergy*, 23-Sep-2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953420303159?dgcid=rss_sd_all. [Accessed: 14-May-2021].
 - [9] M. Kaur, Y. Neetu, and S. P. Verma, "Effect of Chemical Pretreatment of Sugarcane Bagasse on Biogas Production," *Materials Today: Proceedings*, 19-Feb-2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320303497>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [10] Y. Deng, Y. Qiu, Y. Yao, M. Ayiania, and M. Davaritouchaee, "Weak-base pretreatment to increase biomethane production from wheat straw," *Environmental Science and Pollution Research*, 02-Jul-2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09914-7>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [11] J. Kainthola, A. S. Kalamdhad, V. V. Goud, and R. Goel, "Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion," *Bioresource Technology*, 25-Apr-2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930598X>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [12] H. L. Thomas, J. Seira, R. Escudié, and H. Carrère, "Lime Pretreatment of Miscanthus: Impact on BMP and Batch Dry Co-Digestion with Cattle Manure," *MDPI*, 02-Jul-2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1420-3049/23/7/1608>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [13] P. A. Cremonez, S. C. Sampaio, J. G. Teleken, T. W. Meier, E. P. Frigo, E. de Rossi, E. da Silva, and D. M. Rosa, *Effect of substrate concentrations on methane and hydrogen biogas production by anaerobic digestion of a cassava starch-based polymer*, 01-Jan-1970. [Online]. Available: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/6916150>. [Accessed: 14-May-2021].
 - [14] H. Carrere, G. Antonopoulou, R. Affes, F. Passos, A. Battimelli, G. Lyberatos, and I. Ferrer, "Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application," *Bioresource Technology*, 10-Sep-2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852415012754>. [Accessed: 15-May-2021].
 - [15] S. R. Paudel, S. P. Banjara, O. K. Choi, K. Y. Park, Y. M. Kim, and J. W. Lee, "Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges," *Bioresource Technology*, 01-Sep-2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417314967>. [Accessed: 15-May-2021].

- [16] P. Rusanowska, M. Zieliński, M. R. Dudek, and M. Dębowski, "Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Methane Fermentation in Innovative Reactor with Cage Mixing System," *Journal of Ecological Engineering*, 01-Sep-2018. [Online]. Available: <http://www.jeeng.net/Mechanical-Pretreatment-of-Lignocellulosic-Biomass-for-Methane-Fermentation-in-Innovative,89822,0,2.html>. [Accessed: 15-May-2021].
- [17] D. G. Mulat, S. G. Huerta, D. Kalyani, and S. J. Horn, "Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment and bioaugmentation with cellulolytic bacterium *Caldicellulosiruptor bescii*," *Biotechnology for Biofuels*, 29-Jan-2018. [Online]. Available: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-018-1025-z>. [Accessed: 15-May-2021].
- [18] B. Saletnik, G. Zagula, M. Bajcar, M. Czernicka, and C. Puchalski, "Biochar and Biomass Ash as a Soil Ameliorant: The Effect on Selected Soil Properties and Yield of Giant Miscanthus (*Miscanthus x giganteus*)," *MDPI*, 22-Sep-2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2535>. [Accessed: 15-May-2021].
- [19] D. Kovacic, D. Kralik, S. Rupcic, D. Jovicic, R. Spajic, and M. Tišmac, "Soybean straw, corn stover and sunflower stalk as possible substrates for biogas production in Croatia: A review," *Mendeley*, 01-Jan-1970. [Online]. Available: <https://www.mendeley.com/catalogue/c71473bc-69ad-33d3-b288-43122961c887/>. [Accessed: 15-May-2021].
- [20] M. A. H. Siddhu, J. Li, R. Zhang, J. Liu, J. Ji, Y. He, C. Chen, and G. Liu, "[PDF] Potential of Black Liquor of Potassium Hydroxide to Pretreat Corn Stover for Biomethane Production: Semantic Scholar," *undefined*, 01-Jan-1970. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-of-Black-Liquor-of-Potassium-Hydroxide-to-Siddhu-Li/8b797f2e16325caed78cfd039062aaeb6b0013c7>. [Accessed: 15-May-2021].
- [21] F. R. Amin, H. Khalid, H. Zhang, S. u Rahman, R. Zhang, G. Liu, and C. Chen, "Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion," *AMB Express*, 28-Mar-2017. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13568-017-0375-4>. [Accessed: 15-May-2021].
- [22] F. R. Amin, H. Khalid, H. Zhang, S. u Rahman, R. Zhang, G. Liu, and C. Chen, "Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion," *AMB Express*, 28-Mar-2017. [Online]. Available: <https://amb-express.springeropen.com/articles/10.1186/s13568-017-0375-4>. [Accessed: 15-May-2021].
- [23] J. Baruah, B. K. Nath, R. Sharma, S. Kumar, R. C. Deka, D. C. Baruah, and E. Kalita, "Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products," *Frontiers*, 03-Dec-2018. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2018.00141/full>. [Accessed: 15-May-2021].
- [24] M. Zhurka, K. Stamatelatos, A. Spyridonidis, and I. Vasiliadou, "Biogas Production from Sunflower Head and Stalk Residues: Effect of Alkaline Pretreatment," *Molecules (Basel, Switzerland)*. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31906116/>. [Accessed: 15-May-2021].
- [25] H. Carrere, G. Antonopoulou, R. Affes, F. Passos, A. Battimelli, G. Lyberatos, and I. Ferrer, "Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application," *Bioresource Technology*, 10-Sep-2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852415012754>. [Accessed: 15-May-2021].
- [26] B. Weber, A. Estrada-Maya, A. C. Sandoval-Moctezuma, and I. G. Martínez-Cienfuegos, "Anaerobic digestion of extracts from steam exploded Agave tequilana bagasse," *Journal of Environmental Management*, 03-Jun-2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719307212>. [Accessed: 15-May-2021].
- [27] V. Khatri, F. Meddeb-Mouelhi, K. Adjallé, S. Barnabé, and M. Beauregard, "Determination of optimal biomass pretreatment strategies for biofuel production: investigation of relationships between surface-exposed polysaccharides and their enzymatic conversion using carbohydrate-binding modules," *Biotechnology for Biofuels*, 18-May-2018. [Online]. Available: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-018-1145-5/figures/4>. [Accessed: 15-May-2021].
- [28] B. Satari, K. Karimi, and R. Kumar, "Cellulose solvent-based pretreatment for enhanced second-generation biofuel production: a review," *Sustainable Energy & Fuels*, 28-Sep-2018. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/se/c8se00287h#!divAbstract>. [Accessed: 15-May-2021].
- [29] M. Zieliński, M. Dębowski, M. Kisielska, A. Nowicka, M. Rokicka, and K. Szwarc, "Cavitation-based pretreatment strategies to enhance biogas production in a small-scale agricultural

- biogas plant," *Energy for Sustainable Development*, 17-Jan-2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082618306410>. [Accessed: 15-May-2021].
- [30] J. U. Hernández-Beltrán, I. O. Hernández-De Lira, M. M. Cruz-Santos, A. Saucedo-Luevanos, F. Hernández-Terán, and N. Balagurusamy, "Insight into Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass to Increase Biogas Yield: Current State, Challenges, and Opportunities," *MDPI*, 06-Sep-2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/18/3721>. [Accessed: 15-May-2021].
- [31] R. O. Arazo, D. A. D. Genuino, M. D. G. de Luna, and S. C. Capareda, "Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor," *Sustainable Environment Research*, 18-Nov-2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468203916300875>. [Accessed: 15-May-2021].
- [32] R. Isemin, D. Klimov, O. Larina, A. Mikhalev, and V. Zaitchenko, "Integrated Waste Treatment System Combining Biogas Technology and Pyrolysis," *Chemical Engineering Transactions*. [Online]. Available: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET1867085>. [Accessed: 15-May-2021].