EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Estudio teórico sobre el efecto del uso de soportes orgánicos en el proceso de digestión anaeróbica

María Paula Garay Jácome y Rosaura Angélica Parra Suárez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano

Doctora en Ingeniería Química

Codirectores

Humberto Escalante Hernández; Doctor en Ingeniería Química

Jaime Jaimes Estévez; Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios, por su amor e infinita bondad. Por la sabiduría y fortaleza que me dio para llegar hasta acá, porque incluso cuando los días eran grises Él iluminaba mi camino hacia la meta.

A mi mami Andrea, por su esfuerzo y apoyo incondicional en mi formación académica, porque me ha dado todo para lograr ser la mujer que soy, por su entrega de manera desinteresada llena de amor y cuidados.

A mi papi Enrique, que ha sido mi motivación a ser cada día mejor.

A Rosita, mi compañera de trabajo de grado, porque un día hicimos nuestros votos para trabajar juntas y a pesar de las circunstancias siempre confió en mí.

A Paula y Alexa, por acompañarme en esta etapa, mis amigas incondicionales que las llevaré en mi corazón.

A mí, por aferrarme a la vida y disfrutarme el proceso para convertirme en ingeniera.

Paula Garay

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

Mis padres Roque y Celina, quienes me inspiraran y son el motivo para culminar esta etapa de formación profesional.

Mi hermana Claudia, por su apoyo incondicional y por ser un sustento y pilar fundamental en mi vida.

Mis sobrinos y a mi hermana Yulcy, por todo el amor, cariño y apoyo a lo largo no solo de la carrera sino de la vida.

Mis demás familiares y amigos.

Rosaura Parra.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por guiarnos en el camino que recorrimos para lograr nuestra meta de ser ingenieras, la fortaleza para superar los obstáculos que se presentaron en proceso y la tenacidad para no desistir.

Agradecemos la Universidad Industrial de Santander nuestra alma máter, por brindarnos la oportunidad de hacer parte de ella y abrirnos las puertas para estudiar. Así como a la Escuela de Ingeniería Química y a cada uno de sus docentes quienes nos brindaron sus conocimientos y participaron en nuestra formación profesional.

Agradecemos especialmente a los profesores Liliana del Pilar Castro y Humberto Escalante por haber aceptado que realizáramos este trabajo de grado y por orientarnos en el correcto desarrollo de esta monografía.

Agradecemos a nuestro codirector Jaime Jaimes por todas sus enseñanzas, consejos y apoyo desde que el proyecto era solo una idea hasta la finalización de este. Su compromiso y entrega nos permitió la culminación de este trabajo para obtener el título de ingenieras químicas.

Agradecemos al grupo de investigación INTERFASE, al laboratorio de Digestión Anaeróbica y todos los técnicos y profesionales por sus enseñanzas.

Tabla de Contenido

Introducción **11**

1. Objetivos **14**

1.1. Objetivo general 14

1.2. Objetivos específicos 14

2. Metodología **15**

2.3. Primera Fase: Estudio de la Influencia de los Soportes Orgánicos Sobre la Microbiología del Proceso de DA 15

2.3.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica. *15*

2.3.2. Actividad 2. Clasificación de los soportes orgánicos en función de sus propiedades físicas. *16*

2.3.3. Actividad 3. Estudio bibliométrico en función de la temperatura del proceso de DA implementando el uso de soportes. *16*

2.4. Segunda Fase: Evaluación de la Incidencia del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Estabilidad del Proceso y el Rendimiento de Producción de Biogás 17

2.4.1. Actividad 4. Incidencia del soporte en la estabilidad de la digestión anaeróbica, la producción de biogás y su calidad (contenido de metano). *17*

2.5. Tercera Fase: Planteamiento de Una Alternativa para Mejorar el Proceso de DA Usando un Soporte Orgánico 17

2.5.1. Actividad 5. Propuesta de mejoramiento de la DA para un caso de estudio. *17*

3. Resultados **19**

3.1. Efecto del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Microbiología del Proceso de DA. 19

3.1.1. Revisión bibliográfica. *19*

3.1.2. Generalidades de la influencia del uso de soportes orgánicos en el proceso de DA. *23*

3.1.3. Implementación del uso de soportes en la DA bajo diferentes condiciones de temperatura *30*

3.1.4. Efecto del uso de soportes orgánicos en la microbiología de la DA *32*

3.2. Evaluación del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Estabilidad del Proceso y el Rendimiento de Producción de Biogás 35

3.2.1. Incidencia del soporte en la estabilidad de la digestión anaeróbica. *35*

3.2.2. Incidencia del soporte en los rendimientos de producción de biogás y su calidad. *37*

3.3. Alternativa para Mejorar el Proceso de DA Utilizando un Soporte Orgánico 39

3.3.1. Información del caso de estudio. *39*

3.3.2. Estrategia para el mejoramiento del proceso de DA. *40*

3.3.3. Recomendaciones finales para implementar el uso de biocarbón en el proceso de DA. *43*

Conclusiones **44**

Bibliografía **45**

Lista de Tablas

pág.

Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda empleadas para la revisión bibliográfica. 15

Tabla 2. Resumen de los trabajos seleccionados sobre la influencia del soporte en la microbiología del proceso de Digestión Anaeróbica. 25

Lista de Figuras

pág.

Figura 1. Diagrama de flujo general que describe la metodología de la monografía. 18

Figura 2. Número de publicaciones relacionados al proceso de DA utilizando soportes en función del país (n = 131) 20

Figura 3. Estadísticas de trabajos publicados (2006-2020) relacionados con la DA usando soportes (n=131) 21

Figura 4. Publicaciones en función del material de soporte utilizado (n=131) 22

Figura 5. Esquema cronológico de publicaciones en función de la temperatura de operación (n=23) 31

Figura 6. Porcentaje de remoción de materia orgánica en diferentes investigaciones empleando soportes orgánicos en DA. 37

Lista de Anexos

Anexo A. Bitácora: Revisión bibliográfica

Anexo B. Influencia del uso de soportes orgánicos en el proceso de DA: Clasificación de los soportes.

Anexo C. Incidencia del soporte en la estabilidad de la digestión anaeróbica: Contenido de AGV's y remoción de materia orgánica.

Los anexos están adjuntos y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

RESUMEN

Título: ESTUDIO TEÓRICO SOBRE EL EFECTO DEL USO DE SOPORTES ORGÁNICOS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA*

Autor: María Paula Garay Jácome, Rosaura Angélica Parra Suárez**

Palabras clave: Digestión Anaeróbica, soporte, biopelícula, portador, portador orgánico.

Descripción: Los soportes orgánicos en la Digestión Anaeróbica (DA) ayudan a la adherencia de los microorganismos y a su vez, mejoran la producción de biogás, sin embargo, la información reportada en la literatura es limitada. En el presente trabajo se discuten referencias importantes (artículos de revisión, trabajos de investigación y bases de datos), publicados en los últimos 15 años, destacando los desafíos que se presentan en el proceso de DA y las limitaciones de los enfoques convencionales. Esta revisión bibliográfica se llevó a cabo en tres fases: i) Influencia de los soportes orgánicos sobre la microbiología en la DA, ii) Incidencia del uso de soportes orgánicos en la DA y iii) Propuesta de una alternativa para mejorar el proceso de DA usando un soporte orgánico. Teniendo en cuenta la información consultada en cada una de las fases, se propuso un caso de estudio para la implementación de la DA utilizando biocarbón derivado de madera de pino, un soporte orgánico de bajo costo y disponible en el municipio de Cáchira. Con base en lo anterior, se pudo evidenciar que la implementación del uso de soportes orgánicos de bajo costo permite optimizar los parámetros operacionales del proceso de DA incrementando la eficiencia del proceso y la calidad del biogás.

---

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Ingeniera Química, Ph. D. Codirector: Humberto Escalante Hernández. Ingeniero Químico, Ph. D. Jaime Jaimes Estévez. Ingeniero Químico, M. Sc.

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

ABSTRACT

Title: THEORETICAL STUDY ON THE EFFECT OF THE USE OF ORGANIC SUPPORTS IN THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS[*]

Autor: María Paula Garay Jácome, Rosaura Angélica Parra Suárez[**]

Key words: Anaerobic digestion, support, biofilm, carrier, organic carrier.

Description: Organic supports in Anaerobic Digestion (AD) help the adherence of microorganisms and in turn, improve biogas production, however, the information reported in the literature is limited. This paper discusses important references (review articles, research papers and databases), published in the last 15 years, highlighting the challenges faced in the AD process and the limitations of conventional approaches. This literature review was carried out in three phases: i) Influence of organic supports on microbiology in AD, ii) Incidence of the use of organic supports in AD and iii) Proposal of an alternative to improve the AD process using an organic support. Taking into account the information consulted in each of the phases, a case study was proposed for the implementation of AD using biochar derived from pine wood, a low-cost organic support available in the municipality of Cáchira. Based on the above, it became evident that the implementation of the use of low cost organic support allows optimizing the operational parameters of the AD process, increasing the efficiency of the process and the quality of the biogas.

---

[*]Barchelor Thersis

[**]Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Liliana del Pilar Castro Molano. Ingeniera Química, Ph. D. Codirector: Humberto Escalante Hernández. Ingeniero Químico, Ph. D. Jaime Jaimes Estévez. Ingeniero Químico, M. Sc.

Introducción

A escala global, cerca del 50% de la población pertenece a países en vía de desarrollo. En estos países, donde gran parte de su distribución geográfica es rural, los requerimientos energéticos son suplidos en un 35% por biomasa (Humberto Escalante Hernández et al., 2011). Como caso particular, según el informe de 2016 del Ministerio de Minas y Energía, el 3.33% de la población colombiana vive en zonas rurales que aún no cuentan con cobertura al servicio de gas natural (Hernández, 2016). Lo anterior conlleva al uso de gas propano y/o leña como sustituto, generando problemas de salud en los usuarios, así como impactos ambientales negativos, y problemas económicos y técnicos. Una alternativa viable para mitigar estas complicaciones es la digestión anaeróbica (DA) (Fan et al., 2018). La DA es un proceso microbiológico que mediante diferentes etapas metabólicas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) descompone un residuo orgánico y genera energía en forma de biogás, el cual cuenta con una capacidad calorífica considerable (6.56 kWh/m^3) equivalente a un calor útil de 3.3 $kWht/m^3$(Martí Herrero, 2019). Para que la DA se lleve a cabo de manera correcta es necesario que condiciones como la concentración de nutrientes alimentados, la fuente de inóculo y la temperatura sean apropiadas (Jaimes-Estévez et al., 2020). Esta última afecta considerablemente al proceso metabólico debido a que bajo condiciones psicrofílicas (temperaturas menores a 20 ±2 °C) las velocidades de las reacciones químicas y biológicas son ralentizadas en comparación con las obtenidas bajo condiciones óptimas de temperatura (37 ±2 °C) (Lettinga et al., 2001). Una propuesta para el mejoramiento de la DA a bajas temperaturas, es la inmovilización de células microbianas mediante la adición de materiales de soporte orgánicos (A. M. Mshandete et al., 2007; Wahab et al., 2014). Este tipo de soportes permiten la adherencia del consorcio microbiano aumentando la interacción entre los microorganismos y el sustrato a tratar. (Liu et al., 2017). La mayoría de los estudios que utilizan soportes orgánicos en la DA, se enfocan en el mejoramiento de los rendimientos de producción de biogás. Como ejemplo representativo Jang *et*

al., reportaron un incremento del contenido de metano (CH_4) en 27.65% al adicionar biocarbón como portador de biopelícula (Jang et al., 2018). A pesar del uso generalizado de materiales de apoyo para la adherencia de comunidades bacterianas, la literatura es limitada sobre el efecto del uso de soportes orgánicos sobre el metabolismo de la DA.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de soportes orgánicos basada en su efecto sobre: (i) las etapas metabólicas y la microbiología del proceso (en distintas condiciones de temperatura) y (ii) el rendimiento de producción de biogás y la estabilidad de la DA. Finalmente, se propone una guía de ruta para el estudio de DA utilizando soportes orgánicos para la mejora del proceso.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Estudiar mediante una revisión sistemática de la literatura, el efecto del uso de soportes orgánicos en las etapas metabólicas del proceso de digestión anaeróbica.

1.2. Objetivos específicos

- Definir mediante una revisión bibliográfica, el efecto del uso de los soportes orgánicos sobre la microbiología del proceso de digestión anaeróbica bajo diferentes condiciones de temperatura.
- Evaluar la incidencia del uso de soportes orgánicos sobre el rendimiento de producción de biogás y la estabilidad del proceso.
- Proponer una alternativa de mejora para el proceso de digestión anaeróbica usando soportes orgánicos, aplicado a un caso real de la región.

2. Metodología

En este trabajo de investigación, se realizó una revisión de la literatura, sobre el efecto del uso de soportes orgánicos en la DA. Posteriormente, se esquematizó la información para investigaciones experimentales futuras. El desarrollo de esta revisión se planteó siguiendo una metodología distribuida en tres fases.

2.3. Primera Fase: Estudio de la Influencia de los Soportes Orgánicos Sobre la Microbiología del Proceso de DA

2.3.1. Actividad 1. Revisión bibliográfica.

Se realizó la búsqueda de documentos con carácter científico relacionados con el efecto del uso de soportes orgánicos en el proceso de DA. Con el objeto de proporcionar una perspectiva temporal amplia del impacto de la monografía, se optó por publicaciones en una ventana de tiempo de 15 años (*ene/2006 a dic/2020*). La búsqueda se basó en el uso de los recursos bibliográficos de la Biblioteca Virtual de la Universidad Industrial de Santander, debido a que cuenta con más de 750.000 recursos electrónicos (UIS, 2021). La información fue recopilada de bases de datos y revistas electrónicas utilizando ecuaciones de búsqueda. Las ecuaciones de búsqueda son el medio de interacción con el sistema de entrada de los buscadores, y su sintaxis puede variar de un instrumento a otro (Meneses et al., 2005). En la Tabla 1, se resumen las ecuaciones de búsqueda ajustadas a la sintaxis de los motores de búsqueda (Ver anexo A):

Tabla 1.

Ecuaciones de búsqueda empleadas para la revisión bibliográfica.

Número	Buscador	Sintaxis y Ecuación
Ecuación 1	Scopus	$TITLE - ABS - KEY$ (Anaerobic digestion AND Suport AND Biofilm) $AND\ PUBYEAR > 2005\ AND\ PUBYEAR < 2021$

Ecuación 2	Dialnet	$\begin{cases} Buscar\ documentos: anaerobic\ digestion\ carrier \\ Buscar\ documentos: anaerobic\ digestion\ support \end{cases}$
Ecuación 3	Scielo	$\begin{cases} Todos\ los\ indices: (Anaerobic\ digestion)\ AND\ (biofilm) \\ \text{Todos los indices: (Anaerobic digestion) AND (support)} \end{cases}$
Ecuación 4	Nature Research	$Search\ articles\ by\ subject, keyword\ or\ author$ ("$Anaerobic\ digestion$" AND "$biofilm$" AND "$support$")

2.3.2. Actividad 2. Clasificación de los soportes orgánicos en función de sus propiedades físicas.

A partir de la búsqueda bibliográfica, se realizó una categorización de la información con relación a procesos de digestión anaeróbica donde se usan soportes orgánicos. La información recopilada se tabuló (Ver anexo B) teniendo en cuenta los siguientes datos: condiciones operacionales (tipo y volumen de reactor, temperatura, tiempo de retención hidráulica -TRH- y velocidad de carga orgánica -OLR-), aspectos microbiológicos (determinación cualitativa y cuantitativa de los microorganismos, la fuente de inóculo y tiempo de formación) y fuente de nutrientes (sustrato y cosustrato). Específicamente los datos referentes a las propiedades físicas del soporte fueron: origen, tipo, concentración, porosidad, densidad y tamaño.

2.3.3. Actividad 3. Estudio bibliométrico en función de la temperatura del proceso de DA implementando el uso de soportes.

Se realizó un esquema cronológico en función de los estudios de DA dónde se implementaba el uso de soportes como alternativa para el mejoramiento del proceso, con el fin visualizar en que regímenes de temperatura se concentraba la mayoría de los estudios de investigación.

2.4. Segunda Fase: Evaluación de la Incidencia del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Estabilidad del Proceso y el Rendimiento de Producción de Biogás

2.4.1. Actividad 4. Incidencia del soporte en la estabilidad de la digestión anaeróbica, la producción de biogás y su calidad (contenido de metano).

A partir de la revisión bibliográfica que permitió realizar un estudio descriptivo del estado del arte, se examinó el efecto del uso de soportes sobre la estabilidad de la digestión anaeróbica en función del contenido de ácidos grasos volátiles (AGV's) y la remoción de materia orgánica (MO). Adicionalmente, se estudió el efecto de uso de soportes en la producción de biogás y su calidad (contenido de metano).

2.5. Tercera Fase: Planteamiento de Una Alternativa para Mejorar el Proceso de DA Usando un Soporte Orgánico

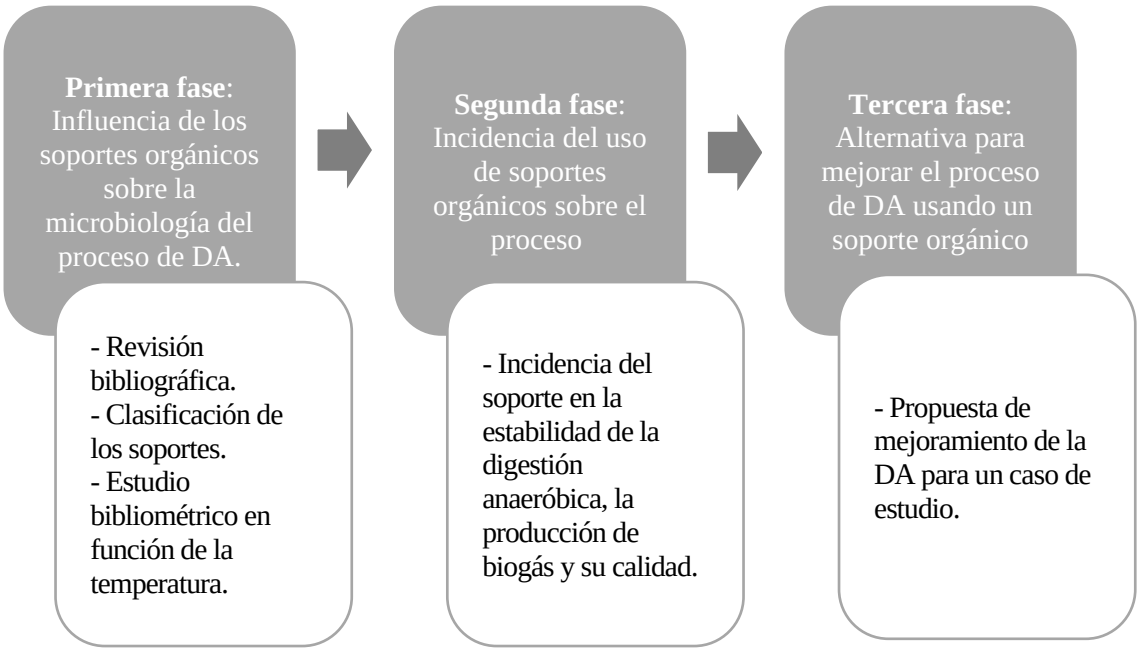
2.5.1. Actividad 5. Propuesta de mejoramiento de la DA para un caso de estudio.

Con base en la información recopilada en las actividades previas, se estableció una alternativa para el mejoramiento de la DA para el caso de estudio del municipio de Cáchira, Norte de Santander. La elección de la región se realizó considerando que es un área montañosa de difícil acceso y carece de redes eficientes de distribución de gas (Consejo Municipal de Norte de Santander, 2020). Adicionalmente, en esta región el grupo de investigación de INTERFASE adelanta investigaciones relacionadas con la biodigestión de estiércol bovino y lactosuero. La propuesta de mejora se realizará implementando un material de soporte teniendo en cuenta los siguientes aspectos: i) las condiciones de temperatura del caso de estudio (psicrofilia); ii) la disponibilidad de recursos en la zona; iii) el tipo de sustrato a tratar; y iv) las características del soporte.

La Figura 1 resume las actividades realizadas para el desarrollo de la monografía cuya metodología permitió dar respuesta a los objetivos planteados.

Figura 1.

Diagrama de flujo general que describe la metodología de la monografía.



3. Resultados

3.1. Efecto del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Microbiología del Proceso de DA.

3.1.1. Revisión bibliográfica.

Con base en las ecuaciones de búsqueda planteadas en la actividad 1, fue posible obtener 131 documentos (120 artículos, 7 *conference paper* y 4 revisiones sistemáticas de la literatura) relacionados con el proceso de DA donde se emplean soportes. En la Figura 2, se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con el número de publicaciones por país a partir de la revisión bibliográfica. En general, se observa un aporte significativo a la temática de investigación por parte de países como Brasil, seguido de Colombia y China, con un total de 18, 13 y 11 publicaciones, respectivamente. Esto puede deberse a la distribución demográfica, por ejemplo, China contiene cerca del 60% de la población mundial (Max Roser, Hannah Ritchie, 2013), y Brasil posee el mayor contenido de territorio de América Latina. Por lo cual, son productores de una gran cantidad de desechos al año, evidenciando el requerimiento de tecnologías para su tratamiento. En el caso de Colombia, se generan aproximadamente 21.000 t/día de residuos sólidos derivado de las actividades residenciales, comerciales e institucionales, equivalente a un porcentaje de material orgánico del 56.4% (Humberto Escalante Hernández et al., 2011). Es por ello que, surge la necesidad de gestionar los residuos emergentes a nivel mundial a través de la digestión anaeróbica (Arif et al., 2018).

De acuerdo con los resultados obtenidos referente a publicaciones académicas sobre el uso de soportes en el proceso de DA, se observa una tendencia constante en cuanto al número de publicaciones por año (ver Figura 3). Sin embargo, en el 2016 se alcanzó el punto máximo con un total de 18 publicaciones. Año durante el cual en Scopus, Dialnet, Scielo y Nature, se publicaron 6, 7, 1 y 4 documentos, respectivamente. Como se muestra en la Figura 3, la base de datos bibliográfica con mayor

aporte es Scopus, con un total de 59 publicaciones, seguida por Dialnet que cuenta con un total de 32 documentos.

Figura 2.

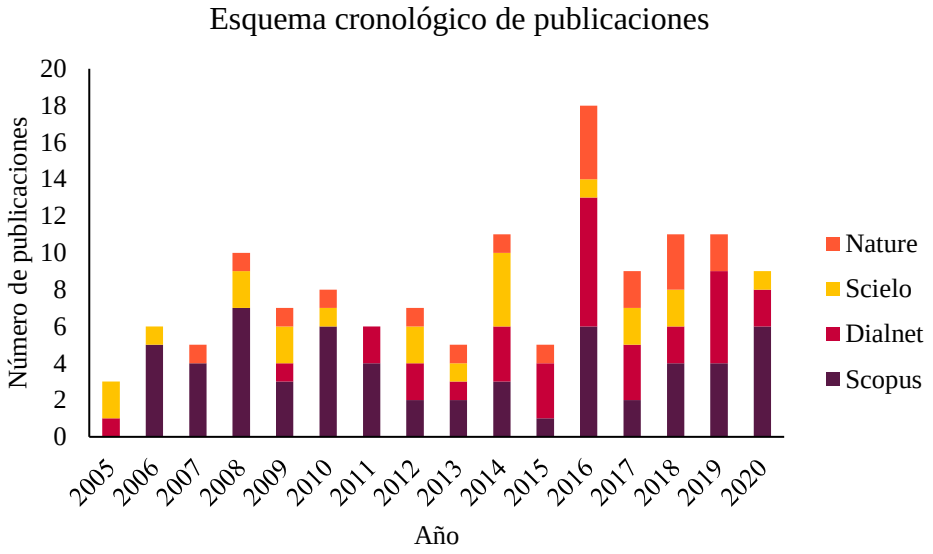
Número de publicaciones relacionados al proceso de DA utilizando soportes en función del país (n = 131)

Así mismo, teniendo en cuenta la Figura 2 y Figura 3, se observa un aporte significativo a la investigación por parte de países latinoamericanos respecto a la temática estudiada. Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia y Paraguay han inclinado sus publicaciones hacia bases de datos como Scielo y Dialnet. En el caso de Colombia, la mayoría de sus investigaciones han sido publicadas en la *Revista Colombiana de Biotecnología*, indexada en la base de datos de Dialnet, que cuenta con un bajo reconocimiento internacional en consecuencia de la calidad de sus artículos, con un factor de impacto de 0.111 en 2020 (Universidad Nacional de Colombia, 2018). Por lo anterior, se evidencia la carencia de disponibilidad de recursos destinados a la producción científica que permita cumplir con los estándares que exigen revistas académicas con gran impacto en la investigación y reconocidas por sus altos índices

de publicaciones (por ejemplo *Bioresource Technology Journal*, factor de impacto = 9.642) (Elsevier, 2021).

Figura 3.

Estadísticas de trabajos publicados (2006-2020) relacionados con la DA usando soportes. (n=131)

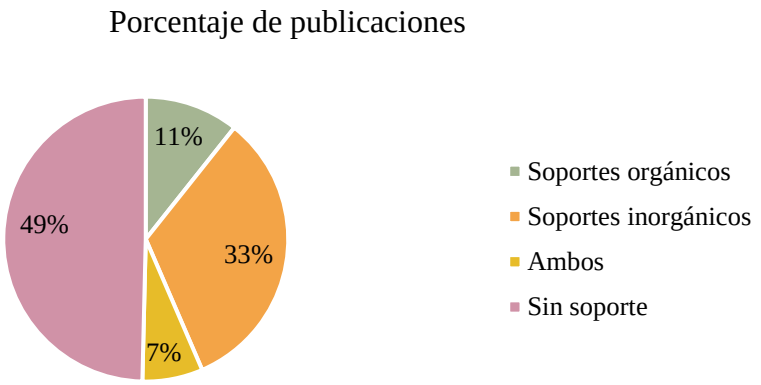


Es sabido que la DA se ve influenciada por la naturaleza del material de soporte. En la Figura 4, se muestra el porcentaje de publicaciones con relación al tipo de material de soporte utilizado. Gracias a su forma definida y durabilidad se utilizan elementos portadores artificiales comerciales que están hechos de polietileno (Garcia et al., 2008), polipropileno (Wahab et al., 2014) y poliuretano. Otros soportes inorgánicos destacables son la grava (Fia et al., 2010), piedra pómez (Garcia et al., 2008; Kassuwi et al., 2013; A. M. Mshandete et al., 2007), perlas de vidrio poroso (A. M. Mshandete et al., 2007) y zeolita (Pérez-Pérez et al., 2017). Sin embargo, algunos de estos soportes son contaminantes y su costo es elevado (Fia et al., 2010). Por su parte, ejemplos destacables de soportes orgánicos son los biocarbones (Bertin et al., 2010; Chen et al., 2014; Cooney et al., 2016; Fia et al., 2010; Garcia et al., 2008; Reza et al., 2015; Shen et al., 2015; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2008; Zhuang et al., 2020), fibra de sisal

(Kassuwi et al., 2013; A. M. Mshandete et al., 2007), tallo de uva (Wahab et al., 2014, 2016) y paja de trigo (Svensson et al., 2007; Wahab et al., 2014). Los materiales orgánicos como portadores de biopelículas son abundantes en la agroindustria y en algunos casos son considerados como residuos sólidos aprovechables. De esta manera los materiales de soporte orgánicos juegan un papel importante en la gestión de residuos, debido a que brindan un enfoque alternativo de bajo costo para mejorar la DA. Por lo anterior, este estudio está centrado en el uso de soportes orgánicos.

Figura 4.

Publicaciones en función del material de soporte utilizado. (n=131)



Es importante aclarar que de las 131 publicaciones seleccionadas cerca del 50% reportan la formación de biopelículas sin uso de soportes, y el porcentaje restante se distribuye en estudios donde se implementan soportes orgánicos e inorgánicos.

Por lo anterior, se seleccionaron 23 documentos relacionados directamente con el tema a desarrollar: digestión anaeróbica utilizando soportes orgánicos. Los estudios que no empleaban soportes orgánicos fueron descartados.

3.1.2.Generalidades de la influencia del uso de soportes orgánicos en el proceso de DA.

La literatura ha informado sobre los efectos del uso de soportes orgánicos en el proceso de DA. La Tabla 2 presenta las investigaciones utilizadas para el desarrollo de la discusión del presente trabajo, sintetizando los aspectos más relevantes de los documentos consultados en la revisión bibliográfica (ver Anexo B). Algunos parámetros seleccionados fueron soporte, concentración de soporte, sustrato, tipo de reactor, inóculo y temperatura. En cuanto a la concentración de soporte, esta dependerá en gran medida de parámetros operativos tanto del afluente como del volumen que se desee tratar en el proceso de DA. Sin embargo, no hay un efecto claro sobre este parámetro debido a que muchos autores no reportan información. Además, se observó que no existe un consenso acerca del efecto de la concentración entre los autores que estudian esta variable. Con relación a las fuentes de sustrato, estas incluyen desechos municipales e industriales como lodos de depuradora y aguas residuales, desechos agrícolas como estiércol animal, desechos de alimentos y residuos de cosecha y fracciones orgánicas de los residuos sólidos urbanos. Estos se caracterizan por ser de fácil biodegradación y con un considerable potencial para la producción de CH_4. Así mismo, referente a la fuente de inóculo, comúnmente se utilizan lodos anaeróbicos de un reactor que han tratado previamente las mismas fuentes de sustratos.

La mayoría de los estudios se realizan en reactores discontinuos a escala laboratorio, debido a la simplicidad de construcción y operación, debido a que permite el ajuste de parámetros operaciones para implementar la escala piloto. La diversidad en cuanto al diseño de los reactores utilizados radica principalmente en la optimización del mezclado y la respuesta a altas cargas orgánicas y la reducción en riesgos de inhibición por sustancias tóxicas (Acharya et al., 2008). Por ejemplo, los digestores de lecho fluidizado tienen un atrapamiento que facilita la retención y el aumento del crecimiento de las células microbianas (Masebinu et al., 2019). Por su parte los reactores anaeróbicos de lecho fijo (AFBR) presentan un buen potencial para el tratamiento de aguas residuales, puesto que se obtienen altos tiempos

de retención de sólidos para una alta eficiencia y estabilidad del sistema, con bajos tiempos de retención hidráulica lo que disminuye costos operacionales (Wahab et al., 2014). Cabe señalar que gran parte de los reactores anaeróbicos se inoculan de manera discontinua, es decir, el material de soporte se pone en contacto con el lodo de inoculación activo dentro del reactor. Algunos autores reportan que el tiempo de contacto del sistema inóculo-soporte favorece el crecimiento de biopelículas en operación discontinua, sin embargo, el tiempo de contacto es una variable empírica que puede durar de días hasta meses y en la mayoría de los artículos revisados no se reportaron datos (ver Anexo B). No obstante, Bertin *et al*., informaron un tiempo de adaptación de 35 a 40 días, antes de añadir las aguas residuales de la molienda de aceitunas al proceso de DA, utilizando GAC como soporte de biopelícula (Bertin et al., 2010).

.

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Tabla 2.

Resumen de los trabajos seleccionados sobre la influencia del soporte en la microbiología del proceso de Digestión Anaeróbica.

Soporte	Concentración de soporte	Sustrato	Inóculo	Temperatura	Tipo de reactor	Resultados y comentarios	Ref.
Lecho de paja de trigo	N/R	Mezcla sin diluir de hojas frescas remolacha y Cultivo de hierba ensilada	Lodo de residuos municipales	33°C	Reactor de columna de plexiglás a escala laboratorio V=4.75 L	↑ nivel de transferencia de masa. Acelera y asegura la fase de aumento de la alimentación. Los microorganismos retenidos en el lecho se adaptaron rápidamente.	(Svensson et al., 2007)
			Digerido de estiércol de vaca	35°C	Reactores de columna de acero aislados a escala piloto V= 390 L		
Carbón Activado Granular (GAC)	N/R	Glucosa	Lodo anaerobio de aguas residuales y glucosa	37°C	Reactor Anaeróbicos de Lecho Fluidizado (AFBR) V=1.4 L	Se logró una retención sustancial de biomasa. Producción de H_2 ligeramente más ↑ en el reactor de biopelícula.	(Zhang et al., 2008)
- Espuma de poliuretano - Carbón vegetal - Piedra pómez sintética - Polietileno de baja densidad	N/R	Aguas residuales domésticas	Lodo anaeróbico de reactor que trata aguas residuales de los mataderos de aves de corral	N/R	Reactor de Biopelícula Discontinuo de Secuenciación Anaeróbica (AnSBBR) V=7.2 L	A comparación de los soportes orgánicos utilizados, el poliuretano mostró mejor inmovilización de células favoreciendo la adaptación de microorganismos.	(Garcia et al., 2008)
- Sisal (especie agave) - Piedra pómez - Perlas de vidrio porosas	N/R	Desechos de tejido de hojas de sisal y medio sintéticos	Lodos de depuradora de un digestor mesófilo	35°C 37°C	Biorreactor de lecho empacado con recirculación de flujo ascendente V=2 L	De los soportes ensayados, la fibra de sisal presentó la máxima producción de CH_4 (2.6 L/L*día) y ↓ DQO alrededor del 80%. Los microorganismos presentes en el soporte de fibras de residuos de sisal parecen ser capaces de mantener concentraciones de AGV's altas con el ↑ OLR sin que se produzcan problemas operativos graves.	(A. M. Mshandete et al., 2007)

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Soporte	Concentración de soporte	Sustrato	Inóculo	Temperatura	Tipo de reactor	Resultados y comentarios	Ref.
- Cubos porosos de cerámica (CCs) - GAC	N/R	Aguas residuales de almazara (OMW)	Agua residual de almazara inoculada con biomasa de alta densidad	25, 35 y 55°C	Reactores de biopelícula de lecho compacto (PBBRs) V=2.5 L	Eliminación de polifenoles, que se agotaron significativamente solo con GAC. ↓ DQO mucho mayor con GAC vs. CCs. Los CCs presentaron [ ] de AGV's superiores a las obtenidas en los reactores con GAC. ↑ actividad metanogénica con GAC	(Bertin et al., 2010)
- Biocarbón magnético - Espuma poliuretano - Grava	2.480 kg/m^3 23 kg/m^3 2.820 kg/m^3	Aguas residuales del procesamiento de frutos de café (ARC) diluidas y sin diluir	Lodo de depuradora de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Temperatura ambiente: 6.4°C - 32.9°C	Reactor Anaeróbico de Lecho Fijo con Flujo Ascendente V= 139.5 L	El biocarbón mostró un mejor potencial como material de soporte para la remoción de compuestos fenólicos de ARC alcanzándose la máxima eficiencia de remoción en un 92%.	(Fia et al., 2010)
- Paja de trigo - Tallo de girasol - Tallo de uva Fibra de cactus - Fibra de cactus - Fibra de estropajo - Conos de ciprés	N/R	Agua residual de vino complementada con NH_4Cl y NaH_2PO_4	Lodo industrial de una fábrica de azúcar	35 °C	Reactor anaeróbico de lecho fijo Semicontinuo V=16.7 L	↓ fase lag. Actividad metanogénica adecuada de la biopelícula. Menor costo operativo utilizando biomasa lignocelulósica como soporte portador de biopelícula. ↓ AGV's	(Wahab et al., 2014)
Almidón nativo de yuca (Polímero)	N/R	Mezcla de materia orgánica triturada, agua libre de cloro	Residuos orgánicos urbanos	52°C	Biorreactores de vidrio V=0.8 L	Bajo las condiciones de la prueba, el ensayo exhibe niveles adecuados (CH_4 mayor a 55% y pH final cercano a 7.7) que favorecen el desarrollo de bacterias metanogénicas.	(Camacho Muñoz & Hoyos Concha, 2014)
Biocarbón	N/R	Agua libre de cloro y rumen bovino líquido y fresco	Aguas residuales de trampa de grasa	37°C	Reactor anaeróbico de lecho empacado	↓ TRH de 3.1 a 1.8 d. Mejora en el contenido de comunidades de microorganismos metanogénicos. ↑ N soluble del digerido.	(Cooney et al., 2016)

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Soporte	Concentración de soporte	Sustrato	Inóculo	Temperatura	Tipo de reactor	Resultados y comentarios	Ref.
Biocarbón magnético	20 kg/m^3	N/R	Lodo anaerobio de reactores a escala de laboratorio	42°C	Reactor discontinuo escala laboratorio "jeringas de vidrio" V=0.1 L	Reducción general de NH_4-N en el digerido, esto se puede atribuir al crecimiento de células microbianas. La biopelícula anaeróbica crece de manera homogénea.	(Reza et al., 2015)
- GAC - Tezontle	N/R	Aguas residuales domesticas	Lodos extraídos de un reactor UASB para el tratamiento de aguas domésticas	35°C	Biofiltros de flujo ascendente enchaquetados V= 9.4 L	↑ DQO removido en 80%. ↑ rendimiento de producción CH_4. ↑ capacidad de remoción de materia orgánica usando GAC.	(Mijaylova-Nacheva et al., 2006)
- PVC - Cocus nucifera	N/R	Sustrato estándar (Glucosa, cloruro de amonio, bicarbonato de potasio, fosfato monopotásico y etanamida)	Aguas grises	24 - 26°C	Reactor de biopelícula anaeróbico multicámara (AnBR) V= 10 L	↑ OLR y ↓ TRH. ↑ DQO removido.	(Khuntia et al., 2019)
Carbón activado a base de lodo de depuradora dopado con nitrógeno Fe3O4/N-SBAC	5 kg/m^3	Aguas residuales de planta de gasificación de carbón	Lodo anaerobio de planta de tratamiento de aguas residuales de planta de gasificación	37 ± 1°C	Reactor UASB escala laboratorio V= 2.8 L	↑ tasa de producción de CH_4. Reducción de la toxicidad de las aguas residuales. Fe_3O_4/N-SBAC promovió la formación de flóculos de lodo más grandes y estables.	(Zhuang et al., 2020)
- Fibra de coco - Madera - Nylon	N/R	Vinaza	Lodos de reactor anaeróbico y lechada de estiércol de ganado	37°C	Reactor de columna fija de flujo ascendente V= 3 L	↑ remoción de DQO. ↑ rendimiento de biogás.	(Acharya et al., 2008)

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Soporte	Concentración de soporte	Sustrato	Inóculo	Temperatura	Tipo de reactor	Resultados y comentarios	Ref.
Tallos de uva	1 kg	Etanol	Aguas residuales sintéticas de bodega de viñedo	35 °C	Reactor anaeróbico de lecho fijo V= 16.7 L	↑ eficiencia de remoción de DQO. ↓ en la concentración de AGV's.	(Wahab et al., 2016)
- Biocarbón BEC - Biocarbón ESI - Biocarbón Klin	50 kg/m^3	Etanol	Consorcio microbiano de cultivos de laboratorio	30 °C 37 °C	N/E	Estimulación de la transferencia directa de electrones entre especies (DIET) mejorando la producción de CH_4.	(Chen et al., 2014)
Biocarbón derivado de estiércol bovino (M-BC)	0 kg/m^3 1 kg/m^3 10 kg/m^3	Estiércol	Fondo del Lago Tarleton	20 °C 35 °C 55 °C	N/E V= 0.28 L	↓ fase lag. ↓ la concentración de AGV's totales y ácido propiónico. ↑ potencial de nutrientes en el digerido. ↑ alcalinidad y ↑ producción de CH_4. ↑ alcalinidad y ↑ producción de CH_4. ↑ la resistencia frente compuestos inhibidores. ↑ mejora de la actividad microbiana. La porosidad y el área superficial del biocarbón facilitan la formación de biopelículas.	(Jang et al., 2018)
Biocarbón de rastrojo de maíz	1.82 - 3.64 g/g ST de lodo	N/E	Lodos de aguas residuales	35-55°C	Batch V= 0.6 L	↑ alcalinidad y mitiga la inhibición del NH_3 en el digestor. ↑ secuestro de CO_2 y mejora en el rendimiento de CH_4. Se obtiene un digerido enriquecido con nutrientes como K, N y P con gran potencial para aplicaciones en el suelo.	(Shen et al., 2015)
Vermicompost Biocarbón de vermicompost	N/R	Desechos de cocina	Lodo anaerobio	35 °C	Batch V= 1 L	↑ capacidad amortiguadora de ácidos. Inhibición de la acumulación de AGV's en una proporción menor del 5%.	(Wang et al., 2017)
- Desechos de fibra de sisal - Piedra pómez - Escamas de perca del Nilo	145 kg/m^3 271 kg/m^3 200 kg/m^3	Desechos sólidos de pescado	Lodos anaeróbicos de aguas residuales	27 – 35 °C	Biorreactor de lecho empacado con recirculación de flujo ascendente V= 3 L	↓ DQO debido a la fase lag. ↑ producción de CH_4. ↑ capacidad de amortiguamiento de ácidos.	(Kassuwi et al., 2013)

EFECTO DE LOS SOPORTES EN LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

A continuación, se describen algunas características físicas de los soportes como la densidad, el área de superficie específica (tamaño de partícula) y la porosidad, las cuales influyen directamente sobre la DA.

Densidad. La cantidad de alimentación y la densidad de empaque son factores importantes que afectan la transferencia de masa y la eficiencia operativa del proceso de DA (Jiang et al., 2021). Svensson *et al.*, investigaron el uso de paja de trigo como soporte en un reactor de una sola etapa, tanto a escala laboratorio como a escala piloto, encontrando que una alta densidad de empaquetamiento produce una formación excesiva de AGV's (AGV's totales con un pico de 13 g l^{-1}), lo cual genera una inhibición en los metanógenos del proceso. Además, demostraron que mantener la densidad inicial del lecho entre 60 y 100 g l^{-1}, permite que la paja de trigo funcione como soporte de biopelícula y filtro de partículas (Svensson et al., 2007).

Área de superficie específica. El tamaño de partícula es una propiedad física que repercute en directamente en la DA. Lü *et al*., evaluaron la influencia de diferentes tamaños de partículas de biocarbón (2-5 mm, 0.5-1 mm, 0.075-0.150 mm) en la distribución microbiana durante la DA de glucosa bajo estrés de amonio (NH_4). Demostraron que las bacterias pueden acceder más fácilmente a partículas finas que a partículas gruesas (Lü et al., 2016). Así mismo, Linville *et al*., investigaron la influencia del tamaño de partícula y la concentración de biocarbón (derivado de la cáscara de nuez) en la DA de residuos alimenticios en condiciones mesófilas y termófilas. En su estudio evidenciaron que, a menor tamaño de partícula, mayor remoción de CO_2 pasando de un 51 % para un tamaño de 500 µm a un 61 % para un tamaño de partícula más fino (125 - 137 µm). Los autores acreditan este comportamiento al aumento del área superficial específica si se opera con partículas de menor tamaño (Linville et al., 2017).

Porosidad. Se han investigado diferentes materiales de soporte en configuraciones porosas y no porosas para mejorar el proceso de biometanización en los biorreactores (Arif et al., 2018). Acharya *et*

al., informaron que el predominio de organismos en la biopelícula está influenciado por la porosidad y la superficie del material de soporte (Acharya et al., 2008). Es por ello por lo que la formación de biopelículas tiene lugar rápidamente en los materiales porosos como la fibra de coco y el carbón vegetal en comparación con las fibras de nailon no porosas. Los autores justifican que la retención de microbios por los materiales porosos hizo posible el funcionamiento del biorreactor empacado con fibra de coco, con una OLR alta y un TRH reducido de 31 kg DQO m^{-3} d^{-1} y 6 d, respectivamente. En otro estudio, Jang *et al*., mostraron que la estructura porosa del biocarbón derivado de estiércol, puede contribuir a la transferencia directa de electrones (DIET) o hidrógeno (H_2) entre las bacterias sintróficas y los metanógenos (Jang et al., 2018). Es importante resaltar que muchos autores no reportan información acerca de las propiedades físicas del soporte ni del tiempo de formación de biopelícula, ni sobre el efecto en las comunidades microbianas en el proceso de DA (ver Anexo B). Por lo anterior, es evidente la oportunidad de investigación para identificar el efecto de cada una de las propiedades mencionadas anteriormente.

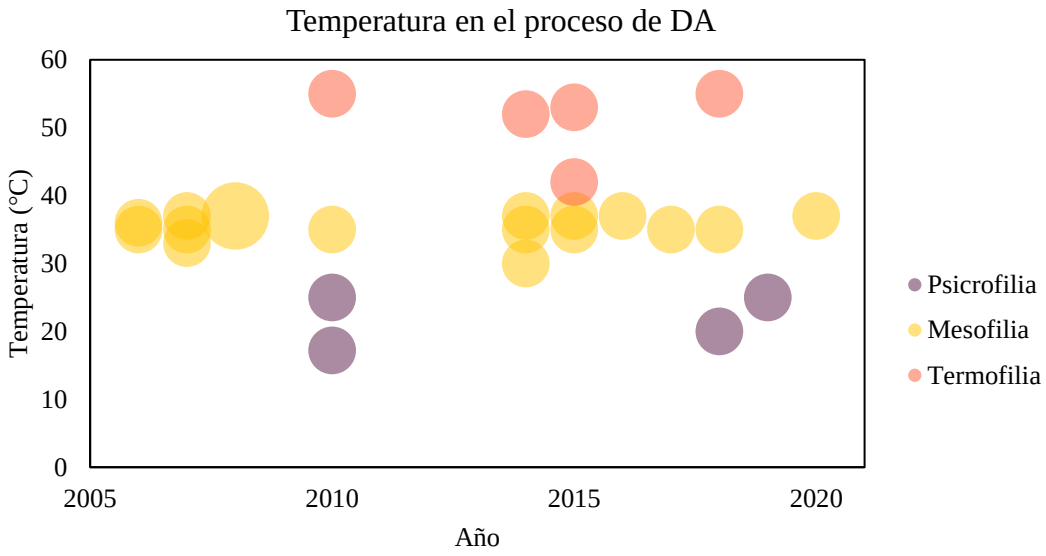
3.1.3.Implementación del uso de soportes en la DA bajo diferentes condiciones de temperatura

La temperatura es un factor muy influyente en el proceso de DA, dado que esta variable limita o acelera los procesos metabólicos de los microorganismos condicionando la supervivencia y las interacciones biológicas (Corrales et al., 2015), afectando la estabilidad del proceso y el rendimiento de metano (Khalid et al., 2011). La Figura 5 presenta un esquema cronológico de publicaciones en función de la temperatura de operación (rango psicrófilo <25°C, rango mesófilo 25°C<T<40°C y rango termófilo >40°C). Se observa una clara tendencia en la temperatura de operación para el rango mesófilo, esto se debe a que a temperaturas cercanas a 35°C la DA es eficiente (Martí Herrero, 2019), la operación es más estable y requiere un menor gasto energético para el mezclado mecánico o agitación (Khalid et al., 2011). No obstante, se evidencia un escaso número de investigaciones en psicrofilia (Bertin et al., 2010; Fia et

al., 2010; Jang et al., 2018; Khuntia et al., 2019), debido a que en climas fríos (entre 5 y 20ºC) se presentan problemas operacionales, ambientales, fisicoquímicos y microbiológicos (Dev et al., 2019).

Figura 5.

Esquema cronológico de publicaciones en función de la temperatura de operación. (n=23)



Autores que estudiaron el proceso de DA en rangos superiores a la mesofilia (37 - 45°C), reportan que estas temperaturas mejoran las condiciones para desarrollarse y crecer de las bacterias metanogénicas, y la velocidad de reacción de la hidrólisis y la acidogénesis es más rápida. Por ejemplo, Mumme *et al*., estudiaron en condiciones termofílicas, el efecto de la adición de biocarbón como soporte, sobre la producción de biogás. Con relación al proceso de DA sin adición de soporte, el rendimiento de metano y la producción de biogás mejoró en un 31% y 46%, respectivamente (Mumme et al., 2014). Por otra parte, Mshandete *et al*., estudiaron el uso de sisal en comparación con piedra pómez y perlas de vidrio porosas, concluyeron que el rendimiento del biorreactor con residuos de fibra de sisal como portador de biopelícula era mayor (2.6 L/L día) en mesofilia (A. M. Mshandete et al., 2007).

En condiciones de psicrofilia (20 °C) implementando soportes orgánicos en la DA, Jang *et al*., investigaron el efecto de la adición de M-BC sobre la producción de metano, reportando que la adición del biocarbón redujo la concentración de ácidos grasos volátiles totales y acido propiónico (413.50 mg DQO/L). Sin embargo, el metano acumulado es considerablemente mayor con adición de biocarbón en condiciones de termofilia y mesofilia, respecto a psicrofilia, con un aumento de 11.02%, 7.31% y 1.18% respectivamente en comparación con el blanco(Jang et al., 2018). Bertin *et al*., estudiaron la digestión anaeróbica acidogénica basada en células inmovilizadas de aguas residuales de la molienda de aceitunas, utilizando GAC como soporte de biopelícula, encontrando un efecto notable de la temperatura en el experimento llevado a cabo a 25°C en la reducción de la metanogénesis, al observarse un aumento de la conversión de AGV's (Bertin et al., 2010). En los dos ejemplos mencionados, se implementó el uso de biocarbón como soporte de biopelícula y las mejoras en la producción de metano se podrían deber a las propiedades físicas del material, abordadas con anterioridad dado que estimula la actividad microbiana de la DA.

Por lo anterior y teniendo en cuenta la poca información que existe sobre el efecto del soporte en el proceso de DA en condiciones de psicrofilia, es evidente la necesidad de investigar el mejoramiento de la tecnología a temperaturas inferiores a 25°C y optimizar los parámetros operativos implementando el uso de soportes orgánicos.

3.1.4.Efecto del uso de soportes orgánicos en la microbiología de la DA

La estabilidad de la DA requiere de un equilibrio simbiótico entre los niveles tróficos de los principales grupos metabólicos de bacterias (bacterias formadoras de ácido, acetógenos productores de hidrógeno obligados) y arqueas (metanógenos) (Angelidaki et al., 2009). Los microorganismos involucrados en el proceso de DA trabajan en serie o grupo para degradar la materia orgánica a través de etapas sucesivas, cada una desencadenando la siguiente (Corrales et al., 2015), es decir, dependen

simbióticamente unos de otros en términos de consumo y producción de metabolitos y además están condicionados por factores físicos y químicos (temperatura, pH, carga MO) que influyen en su adecuado desarrollo (Cooney et al., 2016).

Los soportes orgánicos pueden desempeñar un papel clave en la mejora del proceso de AD al promover el crecimiento microbiano, proporcionando una mejor hábitat y los nutrientes necesarios a los microorganismos anaeróbicos, facilitando las conexiones bioeléctricas entre las células, mejorando la actividad enzimática y la capacidad de amortiguación de compuestos inhibidores (como los AGV's y el NH_4), lo que resulta en una formación y utilización más equilibrada de los AGV's, una producción más rápida de H_2 y CH_4, una fase de retardo más corta, un mayor contenido de CH_4 y una mejor calidad del digestato (Bertin et al., 2010; Chen et al., 2014; Cooney et al., 2016; Khuntia et al., 2019; Zhuang et al., 2020)

Un ejemplo representativo es Zhyang *et al*., quienes concluyen que el Fe_3O_4/N-SBAC promovió el crecimiento microbiano y la actividad enzimática soportados en un análisis microbiológico que sugiere que la presencia del soporte resultó en el aumento de la población y diversidad microbiana. Los autores afirman que la presencia de Fe_3O_4/N-SBAC incrementó la abundancia de microorganismos como: la *Proteobacteria* (26,5%), que es uno de los consumidores críticos de AGV's de cadena larga; la proporción de *Chloroflexi* (16,33%), de la cual algunas bacterias en su filo son socios potenciales en el transporte de electrones entre especies; y *Petrimonas* (6,0%), *Longilinea* (3,1%) y *Ornatilinea* (2,4%), las cuales se relacionan con las degradaciones de compuestos inhibidores como el fenol (Zhuang et al., 2020).

Por su parte, otros autores también sugieren que el biocarbón sirve como un excelente material de empaque para apoyar el crecimiento y la retención de biopelículas ricas en comunidades microbianas metanogénicas debidamente equilibradas. Cuya población dominante era el género *Methanobacterium*

(metanógenos hidrogenotróficos), con abundancias relativas que oscilaron entre el 19,3% y el 31,1%. Las muestras de biocarbón también contenían variedad de otras poblaciones que incluyen los géneros de algunas especies acetogénicas como el *Sporanaerobacter* (2,5%-4,3%) y *Syntrophomonas* (8,5% - 12,3%) y bacterias fermentativas del género *Escherichia* (4,2% - 5,1%) y *Aminobacterium* (6,9% - 8,8) (Cooney et al., 2016).

Uno de los efectos más significativos sobre la microbiología de la DA al utilizar soportes orgánicos, es la disminución de la fase de adaptación o la fase lag. Jang *et al*., reportaron que el efecto de la adición de M-BC acortó la fase lag en la DA en todas las temperaturas de operación evaluadas (25, 35 y 55 °C). Para una concentración de 0 - 10 g de M-BC/L, en condiciones de psicrofilia, la fase lag disminuye de 10.81 d a 9.26 d, en mesofilía de 2.08 d a 1.52 d y finalmente, en termofilia de 3.94 d a 2.98 d. Además, se observa que la concentración de M-BC y la fase de retraso presentan una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor concentración de biocarbón, la fase de retraso disminuye (Jang et al., 2018). Como caso contrario, Kassuwi *et al*., observaron que utilizando escamas del pez como portador de biopelícula en condiciones de mesofilia, la fase de adaptación se extiende, provocando incluso disminuciones en los porcentajes de remoción de materia orgánica (remoción de DQO soluble entre 22% y 40%). Lo anterior acreditado al retardo provocado por la aclimatación microbiana al soporte, debido a su poca afinidad con el inóculo (Kassuwi et al., 2013).

Como cierre de esta primera fase es posible destacar tres aspectos principales enmarcados en el efecto del soporte sobre la DA: i) que un soporte afín al inóculo permite la adhesión de células microbianas mejorando la concentración celular y el contacto entre la biomasa y el sustrato. Adicionalmente, se disminuyen las fases de adaptación y se promueve el desarrollo de microorganismos metanogénicos. ii) Los estudios revisados indican que, a mayor concentración de soporte, menor tamaño de partícula y mayor porosidad, se presentan mejoras en el bioproceso. Además, dependiendo del tamaño

de partícula, es posible la retención de microoganismos en la superficie del soporte. iii) como es sabido, la temperatura afecta directamente a las velocidades de reacción de la DA; el uso de un soporte orgánico en mesofilia mejora la metanogénesis, pero se desconoce el efecto de este a bajas temperaturas.

3.2. Evaluación del Uso de Soportes Orgánicos Sobre la Estabilidad del Proceso y el Rendimiento de Producción de Biogás

3.2.1. Incidencia del soporte en la estabilidad de la digestión anaeróbica.

Los AGV's representan la materia orgánica de fácil acceso para ser biodegradada por parte de ciertos microorganismos. Estos compuestos (ácidos entre 2 y 6 carbonos) son un indicador directo de la estabilidad del proceso: concentraciones superiores a 1.5 y 4 g/l para experimentos en continuo y batch, respectivamente, causan el decaimiento del pH del medio y la inhibición del proceso (Xu et al., 2014). En las investigaciones reportadas en la Tabla 2, se identificó que cuando se utilizan soportes orgánicos, las concentraciones de AGV's están por debajo de los rangos indicados anteriormente (ver anexo C), lo que supondría que estos soportes cuentan con una capacidad amortiguadora, justificada en el aporte de alcalinidad y en la posible adsorción de compuestos inhibitorios.

La adición de biocarbón mejora la generación y consumo de AGV's en la acidogénesis y metanogénesis respectivamente, además, el pH del sistema se mantiene estable, puesto que se evita el desequilibrio entre la acidificación rápida y la metanogénesis lenta mejorando la estabilidad del proceso (Wang et al., 2017). Por ejemplo, H.M. Jang *et al*., informaron que el biocarbón alivia potencialmente la acumulación de AGV's y mejoraba la tasa de degradación de estos, lo que resultaba en una concentración relativamente menor de AGV's durante la DA en comparación con aquellos sin biocarbón (Jang et al., 2018). Lo anterior sugiere que la metanogénesis para la DA sin biocarbón fue insuficiente y que la naturaleza alcalina del M-BC juega un papel importante influyendo en la producción y rendimiento de metano.

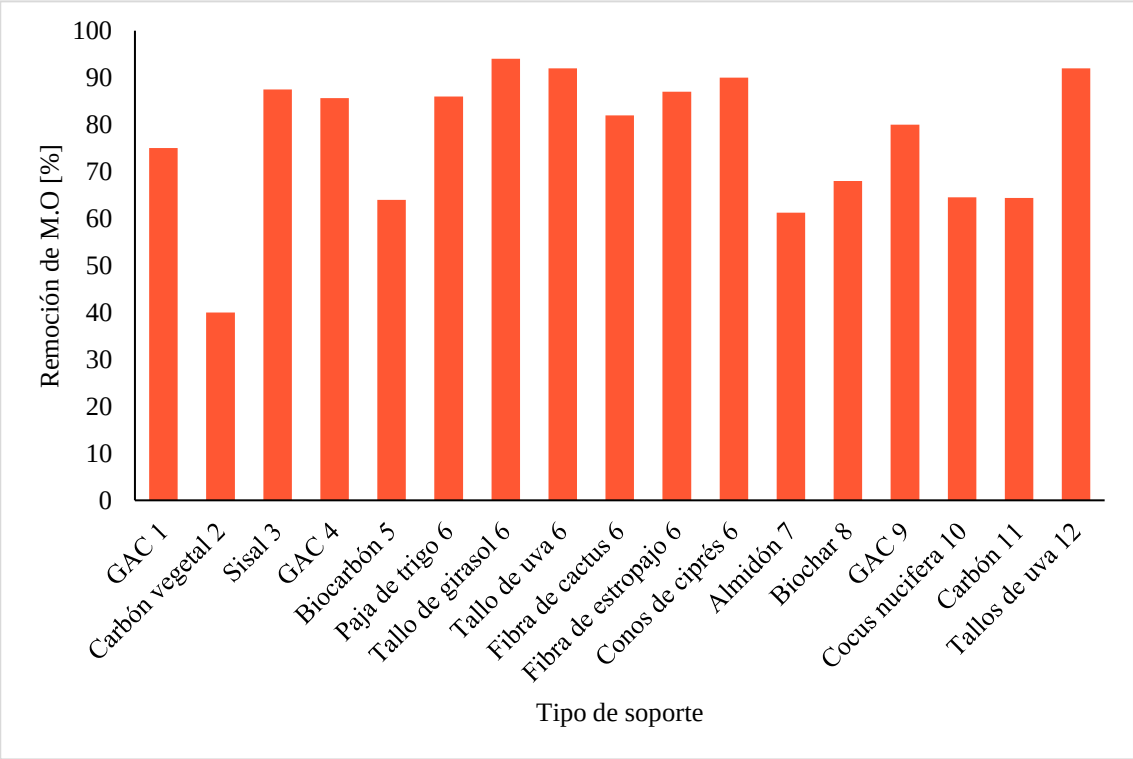
Un efecto similar ocurre al utilizar fibras de sisal como soporte, donde incluso con un aumento en la OLR (hasta 24.9 g DQO l^{-1} d^{-1}) la eficiencia de degradación de AGV's fue superior al 50%. Los autores sugieren que es probable que lo anterior se deba a que el sisal tenga una población autóctona de microrganismos degradantes ya adaptados que aumentó con la alimentación gradual de ácido propiónico (A. M. Mshandete et al., 2007). Referente a los soportes con altas concentraciones de lignina, es posible mencionar que son de difícil biodegradación, por lo cual tienen un aporte reducido a la concentración de AGV's a la salida del proceso (Wang et al., 2017). Así mismo, este tipo de soportes mejora los porcentajes de remoción de materia orgánica, lo anterior se puede evidenciar en la

Figura ***6***. Al utilizar portadores con altas concentraciones de lignina (>20%) se obtienen mayores porcentajes de remoción, siendo del 94% para tallo de girasol, seguido del 92% para tallos de uva y del 90% para los conos de ciprés. No obstante, las características bioquímicas (contenido de lignina y hemicelulosa) del soporte pueden afectar la eficiencia del reactor debido a sobrecargas orgánicas y ser considerado como segundo sustrato (Wahab et al., 2014).

Como caso particular Mijaylova-Nacheva et al., compararon la eficiencia de remoción de DQO utilizando GAC y una piedra porosa, tezontle. Dichos autores encontraron que luego de 40 días se lograba una remoción de DQO cercana al 80% utilizando GAC, mientras que el tezontle requería 145 días, lo cual se atribuye a la capacidad de adsorción de estos materiales. De igual manera, estos soportes permitieron el aumento de la carga orgánica hasta 1.7 kg m-3 d-1 para el tezontle y 22.8 kg m-3 d-1 para el GAC. Adicionalmente este tipo de soportes mejoran la producción de metano, la retención de biomasa y contrarrestan los efectos de compuestos inhibidores (Mijaylova-Nacheva et al., 2006).

Figura 6.

Porcentaje de remoción de materia orgánica en diferentes investigaciones empleando soportes orgánicos en DA.



1 (Fia et al., 2010). 2 (Zhang et al., 2008). 3 (A. M. Mshandete et al., 2007). 4 (Reza et al., 2015). 5 (Masebinu et al., 2019). 6 (Wahab et al., 2014). 7 (Camacho Muñoz & Hoyos Concha, 2014). 8 (Zhuang et al., 2020). 9 (Mijaylova-Nacheva et al., 2006). 10 (Khuntia et al., 2019). 11 (Chen et al., 2014). 12 (Wahab et al., 2016).

3.2.2. Incidencia del soporte en los rendimientos de producción de biogás y su calidad.

Los materiales de soporte orgánicos son una alternativa de bajo costo para asegurar la estabilidad de la metanogénesis para la producción de un biogás con alto contenido en metano (Acharya et al., 2008; Bertin et al., 2010; Garcia et al., 2008). Mshandete *et al*., estudiaron el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de biogás con residuos de fibra de sisal como soporte. Los resultados mostraron que la

reducción del tamaño de partícula (< a 2 mm) aumentaba en un 23% el rendimiento de metano en comparación con las fibras sin tratar (A. Mshandete et al., 2006). Por su parte Bertín *et al*., estudiaron el efecto del material de empaque en el desempeño del proceso utilizando CC's y GAC. Los reactores cargados con GAC produjeron altos rendimientos de metano (cercanos a 0.35 L d CH4 producido por DQO removido), mientras que en los experimentos realizados con CC's, mostraron una baja actividad metanogénica (la producción de metano no superó 0.2 L d CH_4/DQOremovido) (Bertin et al., 2010). Acharya *et al.,* evaluaron la producción de metano utilizando fibra de coco como material de soporte. Esta fibra mostró una mayor producción de biogás con un alto rendimiento de metano, 7.25 m^3 m^{-3} d^{-1} y 4 m^3 m^{-3} d^{-1} respectivamente. Los autores atribuyen lo anterior a la gran área superficial y alta porosidad de la fibra de coco, que permite una mayor retención de microorganismos que favorece el proceso de biometanización en el reactor (Acharya et al., 2008).

En cuanto a soportes porosos Zhyang *et al*., encontraron que la producción de CH_4 podría estar relacionada al efecto estimulante de agentes dopantes como el l Fe_3O_4/N presente en el carbón activado (Fe_3O_4/N-SBAC). Al adicionar este tipo de soporte se favorece el porcentaje de CH_4 disminuyendo el contenido de CO_2. La proporción de CH_4 y CO_2 en el reactor con soporte fue 57.6% y 36.2% mientras que en el control fue 49.8% y 43.5%. Lo anterior se atribuye a que el Fe_3O_4/N-SBAC mejora significativamente la tasa de producción de CH_4 debido a que la presencia de material carbonoso promueve la acumulación microbiana (Zhuang et al., 2020). Por su parte Shen *et al*., mejoraron la calidad del biogás mediante la adición de biocarbón de residuos de maíz. Se obtuvo un aumento en el contenido de CH_4 hasta en un 42.4% y la eliminación de CO_2 fue superior al 85% en comparación con el digestor de control (Shen et al., 2015). Una explicación adicional a este comportamiento es que el biocarbón aporta alcalinidad al sistema, mejorando las condiciones internas para la producción de metano. Además,

las propiedades físicas del biocarbón como el tamaño de partícula y el área superficial mejoran el desarrollo de microorganismos metanogénicos.

Teniendo en cuenta las propiedades físicas mencionadas en la sección 3.1.2, se observa que el uso de un material de soporte (biomasa lignocelulósica o biocarbón) permite mitigar la inestabilidad inducida por el sustrato en el proceso de DA y mejorar la producción de biogás en el digestor. Sin embargo, algunas propiedades de los soportes (la alcalinidad, el intercambio iónico y la morfología superficial) y mecanismos de transferencia entre especies (DIET) deben ser estudiadas para identificar las condiciones óptimas que contribuyen a la mejora de la aplicación de la DA.

3.3. Alternativa para Mejorar el Proceso de DA Utilizando un Soporte Orgánico

3.3.1. Información del caso de estudio.

Como se ha discutido anteriormente, la DA es una tecnología que puede ser mejorada a través del uso de un soporte orgánico. El caso de estudio seleccionado fue el municipio de Cáchira (Norte de Santander). El relieve de Cáchira, determina una amplia diversidad de climas que varían entre 5°C hasta 27°C, con una temperatura promedio de 17°C (*Cáchira, Norte de Santander*, 2019).

El municipio se encuentra a una altura de 2,025 m.s.n.m. y su fisiografía montañosa lo hace una zona de difícil acceso, por tanto, su población no cuenta con cobertura de la red nacional de gas domiciliario. La economía del municipio está basada en la agricultura, silvicultura y la producción pecuaria (Consejo Municipal de Norte de Santander, 2020). Según lo reportado por las Evaluaciones Agropecuarias Municipales del 2018 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MinAgricultura), la actividad económica con mayor crecimiento fue la silvicultura y extracción de madera (70%), sin embargo, la actividad más relevante de la región es la industria láctea que produce cerca de 22,816 litros de leche por día (*Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA | Datos Abiertos Colombia*, 2021). Gran parte de la leche es usada en la elaboración de quesos, en consecuencia, se obtiene un residuo conocido

como lactosuero que no es gestionado, ni valorizado y representa cerca del 90% de la materia prima usada en el proceso. El municipio cuenta con aproximadamente 3,130 vacas que producen el volumen de leche mencionado anteriormente (*Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA | Datos Abiertos Colombia*, 2021). El ganado bovino, genera diariamente alrededor de 8 kg de estiércol/100 kg de peso por cabeza de ganado (Martí Herrero, 2019) cuya incorrecta disposición puede generar problemas ambientales como malos olores, atracción de vectores, emisión de gases de efecto invernadero, contaminación de fuentes hídricas, entre otros (Solarte Toro et al., 2017).

Basado en el panorama descrito anteriormente, surge la necesidad de gestionar y aprovechar los residuos (lactosuero y estiércol bovino) a través del proceso de DA para mitigar el déficit energético. Es importante señalar que la DA de estiércol bovino no presenta altos rendimientos de biogás (aproximadamente 0.32 m^3 biogás/kg SV) debido a la baja presencia de macromoléculas como lípidos y proteínas. Así mismo, en la digestión de lactosuero se presentan problemas de inhibición debido a la acumulación de AGV's provenientes de la fermentación de carbohidratos, lípidos y proteínas (Ferrer et al., 2011). En la actualidad, en el municipio en cuestión se cuenta con un biodigestor de 8 m^3 el cual es alimentado con estiércol bovino y lactosuero. Diariamente se generan alrededor de 2 m^3 de biogás/d (1.2 m^3 CH_4/d) lo cual representa un rendimiento del digestor del 0.25 $m^3_{biogás}$/ $m^3_{digestor}$ d, producción que podría ser mejorada teniendo en cuenta los rendimientos medios para biodigestores de alrededor de 0.3 $m^3_{biogás}$/ $m^3_{digestor}$) y considerando que la calidad del biogás es cerca del 56% esto equivaldría a un potencial energético del 12 kWh aproximadamente (Garfí et al., 2016).

3.3.2. Estrategia para el mejoramiento del proceso de DA.

De acuerdo con lo descrito a lo largo de esta revisión bibliográfica, el uso de soportes favorece de manera general y significativa el proceso de DA. Debido a las condiciones del caso de estudio tales

como la temperatura y los residuos generados en la región, se hace necesaria la selección de un soporte que permita mejorar la codigestión del lactosuero en psicrofilia. Una alternativa viable para abordar el escenario anterior es el uso de soportes orgánicos. A continuación, se describen algunos factores importantes para la selección del soporte a utilizar.

Tipo de sustrato a tratar. La adición de un soporte fibroso o granular, como las biomasas lignocelulósicas (BL) y biocarbón, son de gran interés por parte de los investigadores para mejorar la producción de metano y estabilidad operativa del proceso. Al tratar un sustrato ácido como el lactosuero, es importante tener en cuenta el aporte de AGV's de las BL, ya que su acumulación conduce a una mayor disminución el pH causando inhibición en la etapa metanogénica. Por su parte, el biocarbón permite el desarrollo de una biopelícula que mejora la retención de metanógenos y puede inducir a una mayor producción de metano (Arif et al., 2018). Además, las propiedades del biocarbón influyen en el desempeño de la DA porque aumentan la capacidad amortiguadora del sistema debido a su naturaleza alcalina, mitiga los posibles inhibidores y mejora la calidad del biogás (Fia et al., 2010; Jang et al., 2018; Mijaylova-Nacheva et al., 2006). Así mismo, presenta ventajas económicas y ambientales en comparación a las soluciones convencionales en los procesos de DA (Shen et al., 2015).

Disponibilidad del soporte. Al tener en cuenta la disponibilidad de residuos que pueden ser aprovechados como portador de biopelícula en el municipio de Cáchira, Norte de Santander para implementar el proceso de DA, una alternativa viable es utilizar los desechos de madera, provenientes de la silvicultura y extracción de madera, teniendo en cuenta el crecimiento de esta actividad económica en un 70% para el año 2018 según MinAgricultura (*Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA | Datos Abiertos Colombia*, 2021). Según la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF), la zona centro del departamento de Norte de Santander que incluye al municipio de Cáchira,

cuenta con un área potencial para cultivos comerciales forestales de 278,302 Ha donde se prioriza el cultivo de la especie *Pinus patula* (Pino) (Consejo Municipal de Norte de Santander, 2020).

Propiedades físicas del soporte. Como se mencionó anteriormente (sección 3.1.2) las propiedades físicas como el tamaño de partícula y la concentración del soporte tienen una influencia directa en el rendimiento del proceso. Para el biocarbón Lü *et al*., (Lü et al., 2016) determinaron que un tamaño de partícula de 2 a 5 mm aumentó la producción de metano y Sunyoto *et al*., evidenciaron que la adición de biocarbón por encima de 16.6 g/l resultó en un bajo acumulado de la producción de CH_4 (Sunyoto et al., 2016). Algunos autores muestran que al realizar un pretratamiento a los desechos lignocelulósicos como la conversión termoquímica se mejoran las propiedades físicas del soporte (Cooney et al., 2016; Jang et al., 2018; Sunyoto et al., 2016). Por ejemplo, Zabaniotou et al., informaron que los biocarbones producidos a altas temperaturas (>800°C) tienen una mayor proporción de microporos (50-78%), los cuales están relacionados directamente con el área superficial, atribuyendo una alta capacidad de adsorción (Zabaniotou et al., 2008).

Temperatura del sitio. Mediante la revisión bibliográfica es posible mencionar que la psicrofilia no ha sido muy estudiada, dejando vacíos en cuanto al conocimiento de la influencia del soporte durante el proceso. De los pocos estudios que usan soportes con T<20°C, se destaca Jang *et al*., quienes reportan mejoras en la producción de metano al utilizar biocarbón derivado de estiércol bovino. Los resultados mostraron una mejora en el metano acumulado, con un aumento en 1.18% para el digestor con adición de biocarbón en comparación con el blanco (Jang et al., 2018).

A partir de los factores considerados anteriormente, la mejor alternativa como material de soporte para ser utilizado en el caso de estudio es el biocarbón de madera de pino. En este sentido se plantea la posibilidad de alimentar el biodigestor con dicho material a una concentración entre 10g/L y 16.6g/L, debido a que los datos reportados por Jang *et al*., y Sunyoto *et al*., muestran que la adición de biocarbón

a dichas concentraciones representan óptimos resultados en la DA (Jang et al., 2018; Sunyoto et al., 2016). Se espera que con esta alternativa se obtengan mejoraras en el bioproceso, principalmente en su rendimiento. Vale la pena mencionar que es necesario realizar pruebas experimentales a escala laboratorio que permitan conocer previamente los efectos del uso de este soporte bajo las condiciones establecidas.

3.3.3. Recomendaciones finales para implementar el uso de biocarbón en el proceso de DA.

En investigaciones futuras se podría estudiar la optimización de los rendimientos económicos y ambientales de la producción de biocarbón y su integración en el proceso de DA. La producción del biocarbón tiene una estrecha relación con su rendimiento como soporte, dado que la forma en la que se produce puede afectar características como el tamaño de partícula, porosidad y área superficial. Con base en esto, es fundamental comprender de una mejor manera el control de las condiciones de producción, dosificación y recuperación del biocarbón y los valores óptimos de estas, que permitan potenciar el rendimiento del soporte y su vez, el rendimiento del proceso de DA.

A pesar de que en los últimos años se ha evidenciado un aumento en los trabajos experimentales relacionados con el uso del biocarbón como soporte en la digestión anaeróbica, existen muchos vacíos en la investigación. Con base en lo anterior, se recomienda que en las futuras investigaciones se evalúen las interacciones del soporte con los microorganismos, su velocidad de alimentación, reutilización y demás condiciones de mantenimiento durante el proceso de DA. Por otra parte, también es importante enfocar la investigación en un análisis técnico, económico y ambiental de la integración del biocarbón en la Digestión Anaeróbica.

Conclusiones

Una alternativa viable para el mejoramiento de la DA es el uso de soportes orgánicos debido a su bajo costo y asequibilidad. Entre otras ventajas, su uso repercute tanto en la microbiología como en parámetros de operación del proceso. Por una parte, se reduce la fase lag y el TRH y, por otra parte, los soportes mejoran la retención de biomasa, aumentando el contenido de comunidades microbianas especialmente la de microorganismos metanógenos logrando incrementar la eficiencia del bioproceso y la calidad del biogás.

Los soportes orgánicos tienen un efecto directo en la estabilidad del proceso lo cual se ve reflejado en las altas eficiencias de remoción de materia orgánica y compuestos inhibidores como los AGV's. El uso de estos soportes evita el desequilibrio entre la acidificación rápida y la metanogénesis lenta, lo cual se atribuye a la capacidad amortiguadora del portador de biopelícula, manteniendo estable el pH incluso cuando se aumentan las cargas orgánicas.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas del municipio de Cáchira (T~17°C) y el potencial energético de los residuos utilizados como sustrato (estiércol bovino y lactosuero) y soporte (biocarbón de madera de pino), la integración de un proceso termoquímico y la co-digestión anaeróbica es una alternativa viable para la valorización de dichos residuos. Sin embargo, hay vacíos en los estudios realizados en el tema, lo que hace necesario enfocar las próximas investigaciones hacía una perspectiva ambiental, económica y técnica, que permitan conocer los valores óptimos de operación para mejorar el rendimiento del proceso y la calidad del biogás.

Bibliografía

Acharya, B. K., Mohana, S., & Madamwar, D. (2008). Anaerobic treatment of distillery spent wash - A study on upflow anaerobic fixed film bioreactor. *Bioresource Technology*, *99*(11), 4621–4626. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.060

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, *59*(5), 927–934. https://doi.org/10.2166/wst.2009.040

Arif, S., Liaquat, R., & Adil, M. (2018). Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *97*(January 2017), 354–366. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.039

Bertin, L., Lampis, S., Todaro, D., Scoma, A., Vallini, G., Marchetti, L., Majone, M., & Fava, F. (2010). Anaerobic acidogenic digestion of olive mill wastewaters in biofilm reactors packed with ceramic filters or granular activated carbon. *Water Research*, *44*(15), 4537–4549. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.025

Cáchira, Norte de Santander. (2019). Palacio Municipal, Alcaldía de Cáchira. https://www.cucutanuestra.com/temas/geografia/municipios/region-centro/cachira/cachira.htm

Camacho Muñoz, R., & Hoyos Concha, J. (2014). Biodegradación anaerobia de un material biodegradable bajo digestión anaerobia termófila. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *12*(2), 20–29.

Chen, S., Rotaru, A. E., Shrestha, P. M., Malvankar, N. S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K. P., & Lovley, D. R. (2014). Promoting interspecies electron transfer with biochar. *Scientific Reports*, *4*. https://doi.org/10.1038/srep05019

Consejo Municipal de Norte de Santander. (2020). *Plan de Desarrollo 2020 - 2023*. 1–316. https://www.atlantico.gov.co/index.php/politicas-planes/plandesarrollo/13308-plan-de-desarrollo-2020-2023

Cooney, M. J., Lewis, K., Harris, K., Zhang, Q., & Yan, T. (2016). Start up performance of biochar packed bed anaerobic digesters. *Journal of Water Process Engineering*, *9*, e7–e13. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.12.004

Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, *13*(24), 55. https://doi.org/10.22490/24629448.1717

Dev, S., Saha, S., Kurade, M. B., Salama, E. S., El-Dalatony, M. M., Ha, G. S., Chang, S. W., & Jeon, B. H. (2019). Perspective on anaerobic digestion for biomethanation in cold environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *103*(May 2018), 85–95. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.034

Elsevier. (2021). *Bioresource Technology*. https://www.journals.elsevier.com/bioresource-technology

Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA | Datos Abiertos Colombia. (2021). https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge

Fan, Y. Van, Klemeš, J. J., Lee, C. T., & Perry, S. (2018). Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint. *Journal of Environmental Management*, *223*(May), 888–897. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.005

Ferrer, I., Garfí, M., Uggetti, E., Ferrer-Martí, L., Calderon, A., & Velo, E. (2011). Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*, *35*(5), 1668–1674. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.036

Fia, F. R. L., de Matos, A. T., Borges, A. C., Moreira, D. A., Fia, R., & Eustáquio, V. (2010). Removal of the phenolic compounds in fixed bed anaerobic reactors with different support material. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, *14*(10), 1079–1086. https://doi.org/10.1590/s1415-43662010001000009

Garcia, M. L., Lapa, K. R., Foresti, E., & Zaiat, M. (2008). Effects of bed materials on the performance of an anaerobic sequencing batch biofilm reactor treating domestic sewage. *Journal of Environmental Management*, *88*(4), 1471–1477. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.015

Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 599–614. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071

Hernández, J. S. (2016). *Déficit de energía es solo de 3,33% del total de la población*. La República.

Humberto Escalante Hernández, Lesmes, H. J. Z., Camacho, C. S., Rubiano, L. D. Y., Ruiz, M. C. C., Ortega, M. D., Cataño, D. L., Papagayo, Y. O., Prada, J. O., & Rojas, D. M. C. (2011). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*.

Jaimes-Estévez, J., Castro, L., Sanabria, K., Rondón, Z., & Escalante, H. (2020). *Metodología para la producción de biogás sin riesgos de inhibición en laboratorio : codigestión de lactosuero y estiércol bovino*. 101–108.

Jang, H. M., Choi, Y. K., & Kan, E. (2018). Effects of dairy manure-derived biochar on psychrophilic, mesophilic and thermophilic anaerobic digestions of dairy manure. *Bioresource Technology*, *250*(October 2017), 927–931. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.074

Jiang, H., Shen, Y., Ma, C., Zhao, J., Wang, Y., Li, Y., & Zhou, H. (2021). Solid-state anaerobic digestion of chicken manure and corn straw with different loading amounts. *Polish Journal of Environmental Studies*, *30*(3), 2117–2125. https://doi.org/10.15244/pjoes/124180

Kassuwi, S. A. A., Mshandete, A. M., & Kivaisi, A. K. (2013). Nile perch fish scales a novel biofilm carrier in the anaerobic digestion of biological pre-treated Nile perch fish solid waste. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *8*(2), 117–127.

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, *31*(8), 1737–1744. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021

Khuntia, H. K., Chandrashekar, S., & Chanakya, H. N. (2019). Treatment of household greywater laden with household chemical products in a multi-chambered anaerobic biofilm reactor. *Sustainable Cities and Society*, *51*(December 2018), 101783. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101783

Lettinga, G., Rebac, S., & Zeeman, G. (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, *19*(9), 363–370. https://doi.org/10.1016/S0167-7799(01)01701-2

Linville, J. L., Leon, P. I., Shen, Y., Leon, P. A. I., Schoene, R. P., & Urgun-demirtas, M. (2017). *In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale*. *May*. https://doi.org/10.1177/0734242X17704716

Liu, Y., Zhu, Y., Jia, H., Yong, X., Zhang, L., Zhou, J., Cao, Z., Kruse, A., & Wei, P. (2017). *Effects of different biofilm carriers on biogas production during anaerobic digestion of corn straw*. *244*(30), 445–451. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.171

Lü, F., Luo, C., Shao, L., & He, P. (2016). Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by fi rstly enriching Methanosaeta and then Methanosarcina. *Water Research*, *90*, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.029

Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación.*

Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., & Aboyade, A. O. (2019). A review of biochar properties

and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *103*(January), 291–307. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.048

Max Roser, Hannah Ritchie, E. O.-O. (2013). *World Population Growth*.

Meneses, J., Boixadós, M., Valiente, L., Vivas, P., & Armayones, M. (2005). Construcción de estrategias sistemáticas para la búsqueda exhaustiva de información en Internet: Un marco de toma de decisiones aplicado a la información sobre psicología de la salud. *Information Research*, *10*(3).

Mijaylova-Nacheva, P., Peña-Loera, B., & Cuevas-Velasco, S. (2006). Anaerobic treatment of organic chemical wastewater using packed bed reactors. *Water Science and Technology*, *54*(10), 67–77. https://doi.org/10.2166/wst.2006.803

Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, A. K., Rubindamayugi, M. S. T., & Mattiasson, B. (2006). Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy*, *31*(14), 2385–2392. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.015

Mshandete, A. M., Björnsson, L., Kivais, A. K., Rubindamayugi, M. S. T., & Mattiasson, B. (2007). Performance of biofilm carriers in anaerobic digestion of sisal leaf waste lechate. *Electronic Journal of Biotechnology*, *11*, 582–591. https://doi.org/10.2225/vol10-issue4-fulltext-7

Mumme, J., Srocke, F., Heeg, K., & Werner, M. (2014). Use of biochars in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *164*, 189–197. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.008

Pérez-Pérez, T., Correia, G. T., Kwong, W. H., Pereda-Reyes, I., Oliva-Merencio, D., & Zaiat, M. (2017). Effects of the support material addition on the hydrodynamic behavior of an anaerobic expanded granular sludge bed reactor. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *54*, 224–230. https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.02.011

Reza, M. T., Rottler, E., Tölle, R., Werner, M., Ramm, P., & Mumme, J. (2015). Production, characterization, and biogas application of magnetic hydrochar from cellulose. *Bioresource*

Technology, *186*, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.044

Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Schoene, R. P., & Snyder, S. W. (2015). Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO2 removal. *Applied Energy*, *158*, 300–309. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.016

Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizábal Zuluaga, B. H. (2017). Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio. *Revista ION*, *30*(1), 105–116. https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017008

Sunyoto, N. M. S., Zhu, M., Zhang, Z., & Zhang, D. (2016). Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresource Technology*, *219*, 29–36. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.089

Svensson, L. M., Björnsson, L., & Mattiasson, B. (2007). Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation. *Bioresource Technology*, *98*(1), 46–52. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.023

UIS. (2021). *Biblioteca Virtual*. http://tangara.uis.edu.co/

Universidad Nacional de Colombia. (2018). *Revista colombiana de Biotecnología*. http://www.scielo.co/statjournal.php?lang=es&issn=0123-3475

Wahab, M. A., Habouzit, F., Bernet, N., Jedidi, N., & Escudié, R. (2016). Evaluation of a hybrid anaerobic biofilm reactor treating winery effluents and using grape stalks as biofilm carrier. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *37*(13), 1676–1682. https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1127291

Wahab, M. A., Habouzit, F., Bernet, N., Steyer, J. P., Jedidi, N., & Escudié, R. (2014). Sequential operation of a hybrid anaerobic reactor using a lignocellulosic biomass as biofilm support.

Bioresource Technology, *172*, 150–155. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.127

Wang, D., Ai, J., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., Zeng, Y., & Song, C. (2017). Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering capacity using biochar derived from vermicompost. *Bioresource Technology*, *227*, 286–296. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.060

Xu, Z., Zhao, M., Miao, H., Huang, Z., Gao, S., & Ruan, W. (2014). In situ volatile fatty acids influence biogas generation from kitchen wastes by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *163*, 186–192. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.037

Zabaniotou, A., Stavropoulos, G., & Skoulou, V. (2008). Activated carbon from olive kernels in a two-stage process: Industrial improvement. *Bioresource Technology*, *99*(2), 320–326. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.020

Zhang, Z. P., Show, K. Y., Tay, J. H., Liang, D. T., & Lee, D. J. (2008). Biohydrogen production with anaerobic fluidized bed reactors-A comparison of biofilm-based and granule-based systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, *33*(5), 1559–1564. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.09.048

Zhuang, H., Xie, Q., Shan, S., Fang, C., Ping, L., Zhang, C., & Wang, Z. (2020). Performance, mechanism and stability of nitrogen-doped sewage sludge based activated carbon supported magnetite in anaerobic degradation of coal gasification wastewater. *Science of the Total Environment*, *737*, 140285. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140285