

EFECTO DEL ULTRASONIDO EN LA SOLUBILIDAD DE SUSTRATOS ORGÁNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.

UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

J. A. Ruíz¹, A. Tamayo², J. D. Correa² y G. Hincapié-Mejía²

¹Semillero de Investigación en Ciencias Ambientales. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín, Colombia.

²Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín, Colombia.

jalejandraruiz@est.colmayor.edu.co; andrea.tamayo@colmayor.edu.co; juan.correa@colmayor.edu.co

Palabras clave: Ultrasonido, sustrato orgánico, biogás, cavitación, revisión bibliográfica.

RESUMEN

El pretratamiento con ultrasonido es una tecnología que se ha venido utilizando en los últimos tiempos para acondicionar y optimizar los procesos biológicos dado su potencial para solubilizar sustratos orgánicos. Este estudio, tuvo como objetivo comparar la solubilidad de diferentes sustratos orgánicos aplicando un pretratamiento de ultrasonido para favorecer la etapa de hidrólisis en el proceso de digestión anaerobia, empleando como metodología de trabajo la revisión sistemática de literatura en diferentes bases de datos como ScienceDirect y SpringerLink. Se analizaron los parámetros de sonificación, el impacto ocasionado en cada sustrato y la producción de biogás. Se muestra cómo el pretratamiento con ultrasonido mejora la eficiencia en la solubilización de diferentes sustratos, en rangos de frecuencia entre 20-40 kHz, al igual que temperaturas mesófilas ayudan a optimizar la producción de biogás, y los sustratos como residuos orgánicos y los lodos de las PTAR son los sustratos con mayor rendimiento por su alto contenido de sólidos volátiles.

El rápido crecimiento de la población, la industrialización y la urbanización han resultado en un incremento en la producción de residuos, de los cuales un porcentaje cercano al 60% corresponde a biomasa residual, entre los más representativos se encuentran los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (lodos de depuradora), aguas residuales domésticas y la fracción sólida de residuos orgánicos provenientes de procesos de cosecha y post cosecha, y actividades domésticas e industriales [1]. Según WASTE ATLAS, en Colombia se generan un 59% de residuos orgánicos y 54 millones de m³ al año de aguas residuales [1], que representan emisiones significativas de gases de efecto invernadero, y por lo tanto, contribuyen con el calentamiento global y el cambio climático.

El manejo de la biomasa residual en países latinoamericanos, usualmente tiene un enfoque sanitario en el cual se busca la reducción de impactos sobre la salud pública, pero no de su aprovechamiento y valorización [2]. La creciente mirada hacia la Economía Circular de los procesos productivos, ha llevado a países como Colombia a explorar alternativas para obtener valor energético a través de residuos y retornar estos insumos orgánicos a los procesos naturales y productivos [3]. La incineración, las descargas al océano, la aplicación al suelo y el compostaje son los métodos comunes para la gestión de esta biomasa residual, pero se han desarrollado diversas alternativas tecnológicas entre las cuales se encuentra la digestión anaerobia, la cual es eficiente y sostenible. Los beneficios asociados con esta tecnología son muchos, incluye la reducción de masa, olores y patógenos, usa menos energía en contraste con otras tecnologías y la más importante, la recuperación energética en la forma de metano, y la obtención de efluentes con potencial fertilizante [4].

La digestión anaerobia de biomasa residual es un proceso complejo que convierte los componentes orgánicos en metano y dióxido de carbono en la ausencia de oxígeno por medio de una serie de procesos microbiológicos [5]. Las vías de conversión del sustrato a biogás ocurre en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, mediadas por diferentes grupos de bacterias. El primer grupo involucra las bacterias hidrolíticas y acidogénicas, que hidrolizan los sustratos orgánicos complejos, como los carbohidratos, las proteínas y los lípidos a monómeros solubles como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos, además de CO₂, H₂, ácidos orgánicos y alcoholes. El segundo grupo metabólico son las bacterias acetogénicas, productoras de hidrógeno que convierten los monómeros simples y los ácidos grasos en acetato, H₂ y CO₂. El último grupo son las bacterias metanogénicas, que usan el H₂, CO₂ y acetato para produ-

cir CH₄ y CO₂. De este proceso, la hidrólisis requiere de altos tiempos en comparación con las demás etapas, debido a que la solubilización de biopolímeros y la conversión a compuestos de bajo peso molecular, es un paso limitante [5].

Se han desarrollado diversas tecnologías para los tratamientos de residuos, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos. La optimización de estas tecnologías tiene un valor agregado, ya que puede reducir costos de operación, evitar sanciones de las autoridades ambientales y afectaciones en la salud de las personas [5].

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología que se ha venido aplicando como estrategia para recuperar el potencial energético contenido en biomásas sólidas y líquidas como son los residuos orgánicos, lodo residual y agua residual, esta metodología se ha mejorado y tecnificado para maximizar el aprovechamiento de estos residuales. La hidrólisis es una etapa fundamental en la digestión anaerobia, por lo que se han estudiado métodos de pretratamiento en donde se acelere la solubilización de compuestos de elevado peso molecular. Algunos posibles pretratamientos son los térmicos, químicos, ultrasónicos y biológicos [6].

El ultrasonido es un pretratamiento que permite optimizar los procesos de tratamiento y disposición final de materia orgánica, ya que incrementa el grado de desintegración y la producción de biogás, aumentando la materia orgánica soluble susceptible de ser tratada por métodos biológicos [7]. La principal ventaja de este método es la utilización de presión y temperatura ambiental, y no requiere la adición de compuestos químicos al medio. Por otro lado, su principal desventaja es la poca eficiencia energética de la generación de ondas, ya que requiere importantes aportes de energía a la entrada del sistema [8]. Por esto, se quiere evaluar el efecto del ultrasonido en la solubilidad de la materia orgánica en los diferentes sustratos, de acuerdo con sus características como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos volátiles, identificando el efecto diferencial de tiempos y densidades energéticas.

Los ultrasonidos de baja frecuencia (20 – 40 kHz) se han investigado ampliamente a nivel de laboratorio, piloto y a escala comercial como pretratamiento de digestión de lodos. Además, en los últimos años se ha prestado un interés considerable a la aplicación de ultrasonidos de alta frecuencia como proceso oxidativo destructivo para el tratamiento de contaminantes peligrosos en agua de consumo y aguas residuales industriales y domésticas, mientras que no se ha investigado directamente ninguna

aplicación para la descontaminación de lodos [9]. En esta investigación, se presenta una revisión del efecto del ultrasonido en la solubilidad de sustratos orgánicos para la producción de biogás, como pretratamientos antes de la digestión anaerobia.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

Motores de búsqueda	Ecuaciones de búsqueda	Fecha de consulta	Criterio	Resultados	Artículos descargados
Science Direct	Ultrasound AND organic waste AND methane production.	3/09/2020	año:2020, 2019	322 10	7
	Ultrasound AND Residual Water AND methane production.	3/09/2020	año:2020, artículo de investigación	80	2
	Ultrasound AND methane production.	3/09/2020	año:2020, artículo de investigación	231	3
SpringerLink	Cavitation AND Residual water	3/09/2020	año:2020	601	2
	Ultrasound AND COD	3/09/2020	2015 en adelante	311	4
	Ultrasound AND methane production AND Organic Waste	3/09/2020	2015 en adelante	318	2
	Ultrasound AND biogas AND Residual Water	3/09/2020	2015 en adelante	104	1

Tabla 1. Metodología de búsqueda.

La metodología de esta investigación, consistió en una exploración profunda en diferentes motores de búsqueda como ScienceDirect y SpringerLink, empleando ecuaciones de búsqueda con los términos “ultrasound”, “organic waste”, “residual water” y “methane production”, en el periodo 2015 – 2020. Para los artículos que se iban a incluir, se tuvo en cuenta que el título o resumen incluyeran palabras utilizadas en la búsqueda, que fueran artículos de fácil comprensión y, preferiblemente, en el idioma inglés; esto

explica por qué la cantidad de artículos descargados es mucho menor a la cantidad de artículos encontrados. Los años de búsqueda variaron de acuerdo con la cantidad de artículos relacionados encontrados según la ecuación de búsqueda, entre menos artículos, mayor el rango de años de publicación. En la **Tabla 1** se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

03 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la **Figura 1**, se evidencia un interés creciente sobre el tema. La producción de biogás a partir de materia orgánica es una técnica que se ha venido investigando en los últimos años, ya que ha demostrado que puede suplir parte de las necesidades energéticas principalmente en procesos industriales, esto explica la tendencia en aumento, teniendo en cuenta que ya para el 2021 se han publicado 25 trabajos al momento de la búsqueda. En esta figura, se utilizó la ecuación de búsqueda: ultrasound AND methane production, como motor de búsqueda se implementó ScienceDirect y su principal filtro fueron los años de publicación (2000-2021).

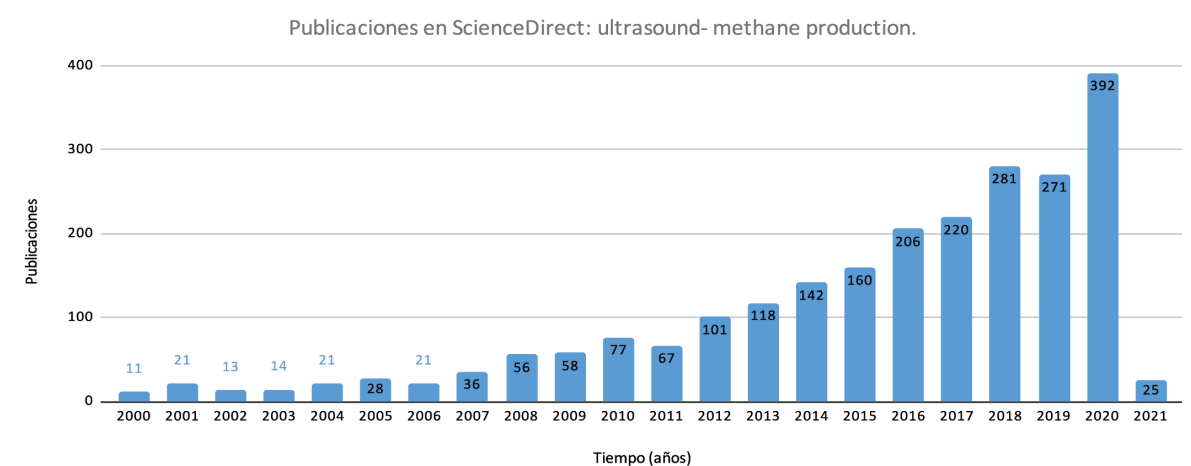


Figura 1. Datos históricos de publicaciones por año de la producción de metano con ultrasonido en ScienceDirect.

3.1 ULTRASONIDO

El pretratamiento con ultrasonido es una técnica de ruptura mecánica reciente y prometedora para el tratamiento de materia orgánica. Las ondas de ultrasonido se transmiten como una serie de ciclos de compresión y de rarefacción, lo que conduce a la formación de burbujas de cavitación que crecen y luego colapsan. La implosión de burbujas se denomina cavitación acústica, como se observa en la **Figura 2**, que puede producir un intenso calentamiento local y alta presión en el interfaz líquido - gas, turbulencia y fenómenos de alto cizallamiento en la fase líquida [10][11].

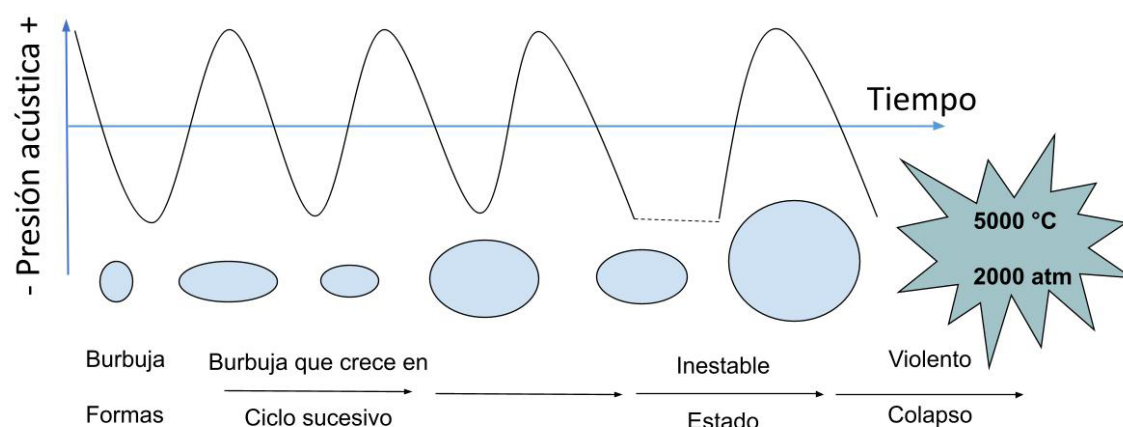


Figura 2. Efecto de la implosión de burbujas, Cavitación acústica.
Elaboración propia.

Los choques entre las burbujas de cavitación componen el comienzo de los efectos químicos y mecánicos de la energía de ultrasonidos. Cada encuentro puede ser considerado como un micro reactor en donde se puede lograr la producción de mucha energía [7].

La cavitación ultrasónica genera fuerzas de corte de alta intensidad que rompen los aglomerados de partículas (estructura compleja) en forma simple. Esta técnica es útil en la disolución de sólidos en líquidos, homogeneización, emulsiones, cationes, extracción celular, limpieza, entre otros [12][13].

Se pueden formar varios tipos de cavitación: (1) Cavitación inestable desarrollada, se forma cuando las nubes de cavitación comienzan a desprenderse, creando pulsacio-

nes de presión, vibración, erosión, altas temperaturas locales y ruido, y pueden usarse para la destrucción de bacterias [14]. (2) Supercavitación, se da cuando la presión del sistema disminuye o cuando se aumenta la velocidad de flujo, logrando que se cree una pequeña cavidad, y se generará un vapor grande y estable desarrollando una super cavidad, para la cual las perturbaciones mayores en la presión y la temperatura son poco comunes (el ruido, la vibración y la erosión están ausentes) [14]. (3) Cavitación acústica, se clasifica como una onda acústica de naturaleza mecánica que oscila a frecuencias superiores a 16 kHz. La cavitación acústica puede ocurrir de diferentes maneras, generando cavitación estable o transitoria. En cavitación estable, la vida útil de las burbujas es más larga. En general, las burbujas están llenas de gas y oscilan alrededor de un tamaño de equilibrio durante su crecimiento a mayor frecuencia. En la cavitación transitoria, la vida útil de las burbujas es más corta. Las burbujas se forman más rápido que un ciclo de alta intensidad [15].

3.2 VARIABLES DE INTERÉS

La potencia es la entrada de energía ultrasónica al líquido podría calcularse con la ecuación (1).

$$W = \frac{dT}{dt} C_p M \quad (1)$$

Donde C_p es la capacidad calorífica específica del líquido (4.2 J/(g.K) para agua) y M es la masa del líquido (g). dT/dt es la tasa de aumento de la temperatura del líquido [10]. El método calorimétrico implica la medición del aumento de temperatura (T) frente al tiempo (t). El valor de dT/dt se estima a partir de la pendiente de las curvas que se ajustan a la mejor línea polinomio/recta o la tangente en el momento cero [16]. Este, permite conocer la cantidad de energía que emite un instrumento en un medio y la variación de la energía ultrasónica afecta la tasa de utilización de la misma, perturbando la eficiencia en diferentes condiciones de tratamientos [10].

La carga del sustrato, generalmente se mantiene por debajo del 10% p/v, de modo que la materia prima pretratada se puede seguir utilizando para otros procesos de fermentación, esto puede variar dependiendo el tipo de materia prima. Es importante tener en cuenta que la carga debe ser baja, ya que si hay mucha concentración, las burbujas no podrían implosionar adecuadamente; se debe tener una homogeneidad para tener una mejor eficiencia del proceso de cavitación [17]. Para el caso de la digestión anaerobia, la carga orgánica es un factor clave que gobierna la actividad metabólica de los

metanógenos, por lo que la salida óptima de un digestor se obtiene cuando el reactor se alimenta con una carga adecuada, ya que el reactor no debe estar sobrecargado o subcargado con materia orgánica (MO) [18].

La cavitación en el agua ocurre a diferentes frecuencias, pero generalmente se usa a frecuencias de 5 kHz a 5 MHz, ya que el tamaño de la burbuja aumenta con la disminución de la frecuencia, lo que reduce el poder explosivo. Esta, expresa el número de ciclos en que se repiten las ondas por segundo en un medio, depende de la potencia de las ondas y duración de la irradiación [11]. Con el aumento del tiempo de sonicación, el tamaño de las partículas se reduce gradualmente, causando ruptura completa de los flocs y su pared celular, pero cuando se adiciona más tiempo del requerido la partícula tiende a aumentar, esto se debe a la re-floculación de las partículas. Inicialmente, los flocs se reducen, pero el aumento del tiempo de sonicación provoca una mayor liberación de polímeros intracelulares debido a la lisis celular que son favorables para la re-floculación [20].

El rango apreciable por el ser humano está entre los 16 Hz y los 18 kHz, los equipos de ultrasonidos se desempeñan en frecuencias mayores a 20 kHz que, a su vez, se dividen en tres franjas: ultrasonidos de alta potencia (Frecuencias que oscilan entre 20-100 kHz), ultrasonidos de baja potencia (Frecuencias entre 100 kHz-1 MHz) y ultrasonidos de diagnóstico (1-100 MHz) [7].

Cuando la radiación ultrasónica se absorbe en un líquido, la energía del sonido se transfiere a la energía térmica (energía contenida en un sistema que es responsable de su temperatura) del líquido, lo que puede ocasionar un alza en la temperatura del líquido y una dilatación volumétrica [10].

El ciclo de trabajo es uno de los procesos más importantes, ya que decide la intensidad del efecto de la cavitación. El tiempo de encendido y apagado varía con el ciclo del trabajo, por ejemplo, un ciclo de trabajo del 20%, el ultrasonido estará prendido por 2 segundos y apagado por 8 segundos, en cada ciclo de 10 segundos. Uno de los mejores rangos para la aplicación del ultrasonido está entre 20% y 70%, pero se debe realizar un estudio porque éste varía dependiendo las especificaciones del sistema [17][21].

3.3 PRETRATAMIENTO

Se han aplicado varias tecnologías para aumentar la digestibilidad anaerobia de los sustratos. Los pretratamientos mecánicos como la maceración, desintegración por ultrasonido y separación sólido-líquido se han aplicado comúnmente. Los estudios

indican que, la hidrólisis y la metanogénesis, mejoran en un 30%. Los pretratamientos químicos como la adición ácida y alcalina, pretratamiento termoquímico y termobárico, también informan mejoras en la hidrólisis y metanogénesis en un 60%. Aunque los métodos de pretratamiento térmico y químico brindan mejores resultados que los métodos mecánicos, los métodos de pretratamiento mecánico se utilizan ampliamente debido a su viabilidad económica [22][23].

Los efectos de diferentes técnicas de pretratamiento sobre la composición química y las características físicas de la biomasa lignocelulósica, afirmaron que la elección del método de pretratamiento depende del tipo de biomasa, y el método apropiado se caracteriza por mejorar la digestibilidad de la biomasa para los microorganismos, evitando la degradación de carbohidratos y requiriendo pocas cantidades o nulas de insumos químicos económicos y bajo aporte de energía, por lo tanto, el pretratamiento ultrasónico es una solución prometedora debido a la baja inversión y la conveniencia operativa [20][24].

El pretratamiento con cavitación, sea solo o en combinación con oxidantes, implica la producción de radical hidroxilo que degrada eficazmente la amplia gama de contaminantes, convirtiéndose en el enfoque de pretratamiento efectivo para la oxidación biológica [25]. En este caso, no se pretende llegar a la oxidación, sino, solo hasta la conversión de moléculas complejas en moléculas más simples, mejorando el tratamiento biológico, produciendo un aumento en la DQO soluble (DQOs). Hay diversos pretratamientos diferentes al ultrasonido, para potenciar la generación de metano en orden de eficacia son: lisis ultrasónica (20W, 9 kHz, 30 min) > pretratamiento térmico en autoclave (120 C, 30 min) > pretratamiento térmico con agua caliente (60 C, 30 min) > congelación (10 C, 15 h) [20].

La materia orgánica (MO) hace referencia a compuestos orgánicos formados a partir de los restos de otros organismos, tales como plantas, animales y subproductos, además de ser biodegradables, es decir, que pueden ser degradados por acción biológica [26]. Identificar las características cualitativas y cuantitativas de estos productos, específicamente los residuos, es algo que se debe considerar, ya que permite analizar y detallar las propiedades de interés para darles una finalidad específica; en el caso de las aguas residuales, la materia orgánica que está presente debe ser removida, la presencia de esta puede ocasionar crecimiento microbiano no deseado en el sistema de distribución, afectar negativamente el proceso de tratamiento de las aguas y reaccionar con desinfectantes como el cloro, generando subproductos nocivos [27]. Por esta razón, se busca implementar estrategias que den un aprovechamiento a este tipo de MO.

La biomasa puede considerarse como un recurso energético que puede utilizarse para proporcionar electricidad y combustibles de transporte para la humanidad

e incluye madera de plantaciones forestales, residuos de producción forestal y de la industria maderera, residuos de la producción agrícola, aceites vegetales, grasas animales y desechos orgánicos de la industria, ganadera y humanos [28][29][30].

La MO con lignocelulosa contienen propiedades químicas que la convierten en un sustrato de enorme valor biotecnológico [31], es el principal componente de la pared celular de las plantas y es producida por los procesos fotosintéticos. En esencia, es la fuente de carbón removible más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía [32].

Algunos residuos orgánicos con altos contenidos de lípidos, pueden producir una mayor cantidad de biogás, ya que estos pueden producir potencialmente casi el doble de biogás en comparación con los carbohidratos o las proteínas, pero presentan una limitación, ya que los lípidos se absorben en superficies sólidas y pueden retrasar la hidrólisis de otros compuestos biodegradables al reducir la accesibilidad de exoenzimas [33].

3.4 SOLUBILIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Diversos estudios han planteado que existe una relación estrecha entre la solubilización y la biodegradación, pero con diferente proporcionalidad [34]. La tasa de solubilización de partículas se rige por el tamaño de las partículas en los desechos, y la producción de metano en el digestor maduro es proporcional a la tasa neta de solubilización del tamaño de partículas. El tratamiento de solubilización con tecnología de microburbujas puede provocar fluctuaciones en los componentes orgánicos y biodegradabilidad relativa de los lodos de la depuradora. Un estudio realizado por L. Wang et al. [35], demuestra que las microburbujas mejoraron claramente la solubilización y aumentaron el contenido de materia orgánica disuelta (MOD) en la fase acuosa.

La aplicación del ultrasonido en los sustratos, de acuerdo a la energía específica aplicada, ocasiona que las paredes de las células de los microorganismos se rompan liberando el material intracelular, y por ello, incrementan la cantidad de material orgánico disponible y disuelto para ser aprovechado por las bacterias anaerobias presentes en el posterior tratamiento anaerobio [7]. Algunos autores recomiendan antes del pretratamiento, que el residuo orgánico crudo se muele o triture en partículas más pequeñas para mejorar la accesibilidad del carbono [36].

El efecto de los pretratamientos realizados sobre la solubilización de la materia orgánica se ha medido en términos de carbono orgánico disuelto (COD), sólidos volátiles

disueltos (SVD), ácidos grasos volátiles totales (AGV) y demanda química de oxígeno soluble [37].

Se han evidenciado resultados en donde se aumenta la materia prima y se disminuye el efecto de la cavitación, la solubilización de la materia orgánica y el cambio en la DQOs [17]. En estudios previos sobre el pretratamiento, se demostró que el uso de ultrasonido de baja frecuencia de alrededor de 20 - 40 kHz arrojó los mejores resultados para la desintegración mecánica y transformación física como se evidencia en la **Tabla 2** [38] en donde se analizan un residuo orgánico y un lodo residual.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes, ya que con la aplicación de ultrasonido la temperatura del sistema tiende a incrementar, por ello hay que mantenerla constante para que los microorganismos sobrevivan y puedan realizar una DA con eficiencia después de aplicar el pretratamiento, esta temperatura debe estar entre 25 - 37°C (mesófilo) [42]. La temperatura es uno de los parámetros cruciales, ya que regula la estructura de la comunidad metanogénica y las vías de conversión bioquímicas. La temperatura a la que opera la DA determina en gran medida la cinética de conversión de la materia orgánica, la estabilidad, la calidad del flujo y el rendimiento de metano [18], por eso se debe tener en cuenta al momento de aplicar el ultrasonido para no tener fallos posteriores en la DA.

Sustratos	%Solubilidad	DQOs (mg/L) inicial-final	Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Referencia
Lodo residual	68,70%	498 - 6872	24	10	[35]
Residuo orgánico	29%	-	40	24	[36]
Residuo orgánico	61,50%	11450 -18500	20	10-dic	[15]
Residuo orgánico	40%	-	20	-	[37]

Tabla 2. Comparación del porcentaje de solubilidad de la materia orgánica de diferentes sustratos, expuestos a diferentes condiciones de pretratamiento con ultrasonido.

Estudios previos demostraron que los mejores resultados para la exposición de la materia prima en el ultrasonido varían de 5 - 30 min. Teniendo en cuenta las demás variables de operación estos son los tiempos con mejores resultados [40][43].

En la **Tabla 3**, se presentan características fisicoquímicas como sólidos totales, sólidos volátiles, DQO y pH de diferentes tipos de material orgánica residual, estos rangos evidencian las variaciones propias de la materia orgánica y cómo su composición impactará en el rendimiento de un tratamiento con ultrasonido.

Materia orgánica residual	ST(%)	SV(%)	DQO(mg/L)	pH
Lodo residual	1.0 ± 0.1	67 ± 0.2	145 ± 20	7.1 ± 0.2
Residuo orgánico	42 ± 3	65 ± 3	11450 ± 20	6.2 ± 0.2
Agua residual municipal	0.0461	0.795	55.040	4.5 ± 0.2

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de la materia orgánica [17][25].

El agua residual es el sustrato con menos porcentaje de sólidos totales (%ST), pero en comparación con el lodo residual y el residuo orgánico, las proporciones de DQO siguen siendo viables para su implementación. Se debe tener en cuenta la necesidad energética y el tiempo de aplicación del ultrasonido para determinar su eficiencia e implementación en la industria.

Las características físicas del sustrato se cuantifican comúnmente por tamaño y densidad de partículas. Normalmente, el sustrato voluminoso requiere una reducción de tamaño para promover la solubilización temprana del proceso de digestión. La reducción del tamaño de las partículas sólidas dará como resultado el agrandamiento de la superficie del sustrato, mejorando la eficacia de los microorganismos durante el proceso de digestión [45].

Las características químicas de los sustratos se evalúan en función de las propiedades principales que incluyen: pH, humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y potencial de biometano (PBM). Estas características influyen directamente en el comportamiento microbiano del proceso [45].

En otros estudios, se observó que no todos los autores reportan o tienen en cuenta todas las variables, por ejemplo, Wang H. [10], reporta su temperatura como “temperatura ambiente” siendo esta 25°C, por otro lado [10] también lo reporta como “temperatura ambiente” tomando esta como 35°C, teniendo una variación de 10°C la una con respecto a la otra, esto genera inconsistencias y complicaciones al momento de realizar los análisis y comparaciones como se observa en la **Tabla 4**.

Frecuencia (kHz)	Tiempo óptimo (min)	Temperatura (°C)	Volumen (mL)	Ciclo de trabajo (%)	Referencia
20	10	35	500	60	[17]
40	24	37	1000	-	[40]
40	30	37	310	-	[45]
25	24	25	80	-	[10]
20	30	30	250	-	[47]
20	-	37	0,75	-	[23]
24	10	-	500	-	[39]
25	20	60	6500	50	[48]
20	0,5	-	400	30	[16]
20	2 a 60	20	250	-	[49]
22	60	35	500	70	[25]

Tabla 4. Variables utilizadas en otros estudios.

Una de las variables que menos es reportada en la literatura, es el ciclo de trabajo el cual lleva a considerar que no se tiene en cuenta, y se trata de una de las variables más importantes, ya que decide la intensidad del efecto de la cavitación. El ciclo de trabajo se define como el tiempo de encendido y apagado, ya que las ondas se siguen propagando después de apagar el ultrasonido. El ciclo de trabajo afecta el consumo de energía y el funcionamiento de los equipos. En general, se recomienda que el modo de pulso de irradiación ultrasónica aumente la vida útil de los transductores y evite el calentamiento excesivo [25].

Se ha evidenciado que el aumento de la producción de gas está relacionado con el cambio de DQO. Después de 60 min de pretratamiento con ultrasonido, la liberación de DQOs por la digestión anaerobia se hizo evidente y la producción de gas también aumentó. Esta, indicó que en los períodos entre 20 y 40 min del pretratamiento ultrasónico, la energía se dispersa principalmente en dispersión celular y destrucción de floc, liberando la mayoría de las sustancias poliméricas extracelulares y algunos de los materiales intracelulares [38].

3.5 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS:

El biogás es una composición de gases generados por la reacción de una agrupación de bacterias, entre esas las metanogénicas, que convierten la materia orgánica en un ambiente en carencia de oxígeno, este gas es compuesto principalmente de 60 – 80% de metano, 30 – 40% de dióxido de carbono y trazas de otros gases, como H_2S , CO , N , H [50].

La producción de biogás mediante DA es una tecnología verificada y comercializada para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. La DA es un proceso biológico durante el cual un sustrato orgánico complejo se descompone en ausencia de oxígeno por medio de numerosos tipos de microorganismos anaerobios [51], que puede ocurrir simultáneamente en un proceso de una sola etapa o por separado en un proceso de múltiples etapas [18][52][53].

La energía contenida en el biogás tiene que ser recuperada y transformada para almacenarla, venderla o reutilizarla. Lamentablemente, la mayoría de las veces, solo la energía eléctrica es útil y genera utilidades, que solo representan un 30% de la energía total contenida en el biogás. Por tanto, cuando se implementa un pretratamiento en un digestor anaeróbico, sus requerimientos energéticos deben ser menores que el incremento de energía eléctrica que produce para asegurar un proceso energéticamente autosuficiente [41] [54].

Para mejorar la hidrólisis y acelerar la producción de metano, varios estudios han sugerido un pretratamiento de lodos antes de la DA como lo es el ultrasonido [55], ya que el tamaño de la partícula es importante, si se optimiza adecuadamente, puede aumentar significativamente la estabilidad y el rendimiento del proceso de DA. Las partículas muy grandes provocarían la obstrucción del digestor y dificultarían la función de digestión de los microbios responsables. Sin embargo, se ha descubierto que la reducción excesiva del tamaño de las partículas sobreestimula las etapas de hidrólisis y acidogénesis para liberar compuestos inhibidores como los AGV, lo que provoca una caída del pH y un fallo del proceso [56]. Algunos autores como K. Izumi, et al [57], evaluaron el efecto de la variación del tamaño de las partículas de 0,391 a 0,888 mm sobre la acumulación de AGV y la producción de biogás a partir de residuos de alimentos. Se observó que la tasa de producción de metano aumentó en un 28% al disminuir el tamaño medio de partícula de 0,888 a 0,718 mm, mientras que la reducción del tamaño de partícula a menos de 0,51 mm dio como resultado una caída significativa en la producción de metano debido a la reducción de la actividad de los microorganismos en un entorno muy ácido.

Por otro lado, se evidencia un aumento en la producción de biogás en el experimento realizado por M. F. M. A. Zamri [44], en donde el contenido de metano del biogás fue del 51% en el lixiviado crudo y del 60% en el lixiviado pretratado ultrasónicamente, lo que indica un aumento del 18%. Este aumento podría atribuirse al aumento de las concentraciones de DQOs por pretratamiento ultrasónico.

04

CONCLUSIONES

Las características fisicoquímicas de los sustratos, la estabilidad de los nutrientes, su capacidad de amortiguación y su eficiencia en la DA, ayudan a determinar los parámetros operacionales para que el proceso sea más eficiente y así el consumo de energía no exceda la capacidad de producción.

Se pudo evidenciar el aumento de publicaciones relacionadas al tema investigado en diferentes países y la importancia que se le ha dado al aprovechamiento de los residuos para la generación de energía, sobre todo en los últimos 10 años, en donde el pretratamiento con ultrasonido sigue dando buenos resultados sin depender del sustrato que se utilice, estos siguen aumentando su porcentaje de solubilidad.

En general, la producción de biogás utilizando el ultrasonido como pretratamiento, reduce el tiempo de generación de biogás en condiciones de operación óptimas, la cual es una opción prometedora e intensificadora de procesos en el campo de la valorización de residuos y el consumo de energía, logrando así implementarse a gran escala en la industria.

El ciclo de trabajo es una variable de estudio que no es frecuentemente reportada en la literatura, pero es una variable de gran interés, ya que puede afectar directamente el funcionamiento del ultrasonido, el efecto sobre el sustrato analizado y variaciones importantes en la temperatura del ensayo.



Los autores agradecen a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por la financiación del proyecto con código FA19.

06 REFERENCIAS

- [1] L. Acevedo and C. Peláez, (2015). "La ciudad Postmoderna: Agujero negro de biosfera," Exp. Univ. Antioquia, pp. 42-47.
- [2] M. De Comercio, (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular.
- [3] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, (2012). "Anaerobic digestion for global warming control and energy generation — An overview," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 16, no. 5, pp. 3228–42.
- [4] K. F. Adekunle and J. A. Okolie, (2016). "A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion," Adv. Biosci. Biotechnol., vol. 6, no. November, pp. 205–212.
- [5] J. Jiang, C. Gong, J. Wang, S. Tian, and Y. Zhang, (2015). "Effects of ultrasound pre-treatment on the amount of dissolved organic matter extracted from food waste," Bioresour. Technol., vol. 155, pp. 266–271.
- [6] L. Yue, J. Cheng, S. Tang, X. An, J. Hua, and H. Dong, (2021). "Ultrasound and microwave pretreatments promote methane production potential and energy conversion during anaerobic digestion of lipid and food wastes," Energy, vol. 228, p. 120-525
- [7] C. Cuenca, (2015). "Diseño de una línea de fangos incluyendo ultrasonidos para la optimización de la digestión anaerobia (100.000 He)" Universidad politécnica de valencia.
- [8] K. G. Labrada, I. Quesada Peñate, C. Julcour Lebigue, H. Delmas, G. C. González, and U. J. Jáuregui Haza, (2010). "El empleo del ultrasonido en el tratamiento de aguas residuales," vol. 41, no. January, pp. 1–11.
- [9] C. M. Braguglia, M. C. Gagliano, and S. Rossetti, (2021) "Bioresource Technology High frequency ultrasound pretreatment for sludge anaerobic digestion : Effect on floc structure and microbial population," Bioresour. Technol., vol. 110, pp. 43–49.
- [10] H. Wang, S.-C. Yang, W. Cai, W. Liu, and A. Wang, (2019). "Enhanced organic matter and nutrient release from waste activated sludge using ultrasound and surfactant synergetic pre-treatment," Bioresour. Technol. Reports, vol. 6, pp. 32–38, Jun.
- [11] M. Ghafarzadeh, R. Abedini, and R. R. C, (2017) "Optimization of ultrasonic waves application in municipal wastewater sludge treatment using repose surface method," in Diario de producción más limpia, vol. 150, pp. 361–370.
- [12] D. Kumari and R. Singh, (2020). "Ultrasonic assisted petha waste water pretreatment of rice straw for optimum production of methane and ethanol using mixed microbial culture," Renew. Energy, vol. 145, pp. 682–690.
- [13] L. V. Perea Romero, (2015). "Evaluación de un reactor de cavitación hidrodinámica a escala de laboratorio para la remoción de carbono orgánico total presente en los lixiviados generados en el relleno sanitario Doña Juana," universidad Libre.
- [14] J. Kosel, M. Šuštaršič, M. Petkovšek, M. Zupanc, M. Sežun, and M. Dular, (2020). "Application of (super)cavitation for the recycling of process waters in paper producing industry," Ultrason. Sonochem., vol. 64, p. 105-002.
- [15] E. M. M. Flores, G. Cravotto, C. A. Bizzi, D. Santos, and G. D. Iop, (2021). "Ultrasonics Sonochemistry Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products : state-of-the-art , perspectives and challenges," Ultrason. Sonochem., vol. 72, p. 105-455.
- [16] B. A. Alagöz and O. Yenigün, (2018). "Ultrasound assisted biogas production from co-digestion of wastewater sludges and agricultural wastes: Comparison with microwave pre-treatment," vol. 40, no. April 2017, pp. 193–200.
- [17] S. M. Joshi and P. R. Gogate, (2019). "Intensifying the biogas production from food waste using ultrasound: Understanding into effect of operating parameters," Ultrason. Sonochem., vol. 59, p. 104-755.
- [18] S. Begum, S. Juntupally, G. Rao, and N. Eshtiaghi, (2020). "Comparison of mesophilic and thermophilic methane production potential of acids rich and high-strength landfill leachate at different initial organic loadings and food to inoculum ratios," Sci. Total Environ., vol. 715.
- [19] S. Pilli, P. Bhunia, S. Yan, R. J. L. C, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, (2011). "Ultrasonic pretreatment of sludge: A review," vol. 18, pp. 1–18.
- [20] C. C. T. Gisel, (2016). "Efecto del pre-tratamiento con ultrasonido de alta intensidad en carne fresca de cerdo para la elaboración de una emulsión cárnica emburida reducida en fosfatos," Universidad Autonoma de Puebla, pp. 120.
- [21] K. Kumar, S. Srivastav, and V. Singh, (2020). "Ultrasonics - Sonochemistry Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products : A review," Ultrason. - Sonochemistry, vol. 70, no. p. 105-325.
- [22] Arpita and M. K. Chandel, (2019). "Bioresource Technology Reports Enhancement of biogas production from organic fraction of municipal solid waste using hydrothermal pretreatment," Bioresour. Technol. Reports, vol. 7, no. May, p. 100-281.
- [23] S. Azman et al., (2020) "Ultrasound-assisted digestate treatment of manure digestate for increased biogas production in small pilot scale anaerobic digesters," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 152, pp. 664–673.
- [24] K. Marta, (2020). "Evaluation of Ultrasound Pretreatment for Enhanced Anaerobic Digestion of Sida hermaphrodita," BioEnergy Research, vol. 13, pp. 824–832.

- [25] P. R. Gogate, P. D. Thanekar, and A. P. Oke, (2020). "Strategies to improve biological oxidation of real wastewater using cavitation based pre-treatment approaches," *Ultrason. Sonochemistry*, vol. 64, pp. 105-016.
- [26] S. B. Ras, J. M. Mendez, M. Rivera, and A. Vargas, (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Sistemas de Aseo Urbano*.
- [27] Z. Zhou et al., (2018) "Ultrasonics - Sonochemistry Optimized removal of natural organic matter by ultrasound-assisted coagulation of recycling drinking water treatment sludge," *Ultrason. - Sonochemistry*, vol. 48, no. 3, pp. 171-180.
- [28] S. V. Peña, (2016) "La biomasa: Importancia, tipos y características y formas de preparación," *Universidad Politecnica de Madrid*.
- [29] J. Ness and B. (2016). *Moghtaderi, Biomass and Bioenergy*, no. January 2007.
- [30] S. Khan, V. Paliwal, V. V. Pandey, and V. Kumar, (2017) "Biomass as Renewable Energy," *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol*, vol. 2, pp. 301-304.
- [31] S. Malherbe and T. E. Cloete, (2002). "Lignocellulose biodegradation : Fundamentals and applications," *Environ. Sci. Bio*, vol. 1, pp. 105-114.
- [32] L. Cuervo and J. L. Folch-mallol, (2009). "Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol .," *Cent. Investig. en Biotecnol.*, vol. 13.
- [33] S. E. Nayono, C. Gallert, and J. Winter, (2010). "Bioresource Technology Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 18, pp. 6987-93.
- [34] L. Nazari et al (2017)., "Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: Process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation," *Water Res*, vol. 113, pp. 111-123.
- [35] L. Wang, Y. Li, Y. Xiong, X. Mao, L. Zhang, and J. Xu, (2017). "Spectroscopic characterization of dissolved organic matter from sludge solubilization treatment by micro-bubble technology," *Ecol. Eng.*, vol. 106, pp. 94-100.
- [36] R. Bedoi, A. Spehar, J. Puljko, L. Cu, B. Cosi, and T. Puk, (2020). "Opportunities and challenges : Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production," vol. 130.
- [37] L. A. Fernandez, C. Álvarez-gallego, D. Sales, and L. I. Romero, (2011). "The use of thermochemical and biological pretreatments to enhance organic matter hydrolysis and solubilization from organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)," *Chem. Eng. J.*, vol. 168, pp. 249-254.
- [38] X. Li et al., (2018). "Anaerobic digestion using ultrasound as pretreatment approach: Changes in waste activated sludge, anaerobic digestion performances and digestive microbial populations," *Biochem. Eng. J.*, vol. 139, pp. 139-145.
- [39] H. Bao, H. Yang, H. Zhang, Y. Liu, H. Su, and M. Shen, (2020). "Improving methane productivity of waste activated sludge by ultrasound and alkali pretreatment in microbial electrolysis cell and anaerobic digestion coupled system," *Environ. Res.*, vol. 180, pp. 108-863.
- [40] F. Karouach, M. Bakraoui, Y. El Gnaoui, N. Lahboubi, and H. El Bari, (2020). "Effect of combined mechanical-ultrasonic pretreatment on mesophilic anaerobic digestion of household organic waste fraction in Morocco," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 310-314.
- [41] R. Cano, (2015) "Energy feasibility study of sludge pretreatments : A review," *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 176-185.
- [42] M. E. Olivera Castro, (2018). "Efecto de un pre-tratamiento de ultrasonido sobre la concentración de amonio y producción de metano durante la digestión anaerobica de lodos sanitarios a bajos tiempos de retención de sólidos," *Universidad de Concepción*.
- [43] S. Pansripong, W. Arjharn, P. Liplap, and T. Hinsui, (2019). "Effect of Ultrasonic Pre-treatment on Biogas Production from Rice Straw," *Orient. J. Chem.*, vol. 35, no. 4, pp. 1265-73.
- [44] M. F. M. A. Zamri et al., (2020). "A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 137, pp. 110-637.
- [45] L. Li, Z. Li, K. Song, Y. Gu, and X. Gao, (2020). "Improving methane production from algal sludge based anaerobic digestion by co-pretreatment with ultrasound and zero-valent iron," *J. Clean. Prod.*, vol. 255, p. 1202-14.
- [46] V. V. Patil, P. R. Gogate, A. P. Bhat, and P. K. Ghosh, (2020). "Treatment of laundry wastewater containing residual surfactants using combined approaches based on ozone, catalyst and cavitation," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 239, p. 116-594.
- [47] V. V. Patil, P. R. Gogate, A. P. Bhat, and P. K. Ghosh, (2020). "Treatment of laundry wastewater containing residual surfactants using combined approaches based on ozone, catalyst and cavitation," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 239, pp. 116-594.
- [48] R. Khandare, P. D. Tomke, and V. K. Rathod, (2020). "Kinetic modeling and process intensification of ultrasound-assisted extraction of d-limonene using citrus industry waste," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, p. 108-181.
- [49] N. A. Oz and C. C. Yarimtepe, (2014). "Ultrasound assisted biogas production from landfill leachate," *Waste Manag.*, vol. 34, pp. 1165-70.
- [50] M. José J. Gutiérrez, Mateus, and D. F. Tamayo, (2019). "Evaluación de la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una PTAR, en un reactor de la Universidad Pontificia Javeriana," *Fundación universidad de américa*.
- [51] R. Zeynali, M. Khojastehpour, and M. Ebrahimi-nik, (2017). "Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and vegetable wholesale market wastes," *Sustain. Environ. Res.*, vol. 27, no. 6, pp. 259-264.
- [52] Z. You, S. Pan, N. Sun, H. Kim, and P. Chiang, (2019). "Enhanced corn-stover fermentation for biogas production by NaOH pretreatment with CaO additive and ultrasound," *J. Clean. Prod.*, vol. 238, pp. 117-813.
- [53] C. Negri et al. (2020), "Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review," *Revis. energías Renov. y sostenibles*, vol. 133, pp. 1-21.
- [54] C. Coskun, M. Bayraktar, Z. Oktay, and I. Dincer, (2012). "Investigation of biogas and hydrogen production from waste water of milk-processing industry in Turkey," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 21, pp. 16498-504.

- [55] V. K. Nguyen et al.(2021), “Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge,” *Fuel*, vol. 285, pp. 105-119.
- [56] S. A. Alavi-borazjani, I. Capela, and L. A. C. Tarelho,(2020). “Biomass and Bioenergy Over-acidification control strategies for enhanced biogas production from anaerobic digestion : A review,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 143, no. October, p. 105-833.
- [57] K. Izumi, Y. Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, and T. Toda,(2010) “Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 64, no. 7, pp. 601–608.

