







## Tecnologías para la producción de biogás y biohidrógeno a partir de lodos en plantas de tratamiento

Yenny Anali TENORIO-ORTIZ \*<sup>1</sup> , Jorge Luis LEIVA-PIEDRA <sup>1</sup> ,  
Daniel Anthony CAJO-LAMADRID <sup>1</sup> , Dalia de Jesús Santa Cruz MEZA <sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, Perú.  
E-mail: \*ytenorio@utp.edu.pe

Enviado: 11/09/2025; Aceptado: 17/03/2026; Publicado: 21/05/2026.

**RESUMEN:** Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representan una fuente valiosa de energía renovable; mediante la aplicación de tecnologías, pueden convertirse en biogás y biohidrógeno, contribuyendo a la sostenibilidad energética y a la economía circular. El presente artículo de revisión sistemática de la literatura buscó analizar las diversas tecnologías empleadas para la producción de biogás y biohidrógeno a partir de lodos en PTAR. Para ello, se utilizó el método PICO para identificar las preguntas de análisis; se trabajó con Scopus y Web of Science; asimismo, se establecieron criterios de inclusión y exclusión y, mediante la metodología PRISMA, se sistematizó el cribado, seleccionándose un total de 64 artículos. Los resultados obtenidos demostraron que, para la producción de biogás y biohidrógeno, destacan procesos como la digestión y la codigestión anaerobias, que emplearon tecnologías para mejorar su eficiencia. Además, se identificaron barreras comunes que dificultan su implementación a gran escala, como el consumo energético, la falta de infraestructura adecuada y la complejidad operativa. Los hallazgos sugieren que estas tecnologías tienen un alto potencial, aunque requieren mejoras técnicas y condiciones favorables para su aplicación sostenible en contextos reales.

**Palabras clave:** generación de energía; energía limpia; tecnologías ecosostenibles; economía circular; revisión sistemática de la literatura.

## Technologies to produce biogas and biohydrogen from sludge in treatment plants

**ABSTRACT:** Sludge generated in wastewater treatment plants (WWTPs) represents a valuable source of renewable energy. Through the application of technology, it can be converted into biogas and biohydrogen, contributing to energy sustainability and the circular economy. This systematic literature review sought to analyze the various technologies used for the production of biogas and biohydrogen from sludge in WWTPs. To this end, the PICO method was used to identify the questions for analysis, working with Scopus and Web of Science. Inclusion and exclusion criteria were also established, and the PRISMA methodology was used to systematize the screening, selecting a total of 64 articles. The results obtained showed that, for the production of biogas and biohydrogen, processes such as anaerobic digestion and co-digestion stand out, which use technologies to improve their efficiency. In addition, common barriers that hinder their large-scale implementation were identified, such as energy consumption, lack of adequate infrastructure, and operational complexity. The findings suggest that these technologies have high potential, although they require technical improvements and favorable conditions to be applied sustainably in real-world contexts.

**Keywords:** energy generation; clean energy; eco-sustainable technologies; circular economy; systematic literature review.

### 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los lodos generados en las PTAR representa una de las principales problemáticas del sector del saneamiento, debido a su volumen, su composición compleja y el alto costo de su disposición final. Los lodos contienen una elevada proporción de materia orgánica, nutrientes, contaminantes emergentes y metales pesados, lo que los convierte en un residuo difícil de tratar, pero, al mismo tiempo, con un alto potencial de valorización energética (HABAGIL et al., 2020; ÖFVERSTRÖM et al., 2020). Diversos estudios señalan que, sin estrategias eficaces de

recuperación, estos residuos representan una carga económica considerable para las PTAR (BWAPWA, 2021; TRUONG et al., 2020).

Ante esta situación, en los últimos años se ha intensificado el desarrollo de tecnologías para la producción de biocombustibles (biogás y biohidrógeno) a partir de lodos. La digestión anaerobia (DA) es una de las tecnologías más consolidadas, ya que permite la estabilización de la materia orgánica y la generación de biogás rico en metano. Otras alternativas emergentes, como la fermentación oscura, buscan producir biohidrógeno como vector energético de

alto valor (RENAUDIE et al., 2021). Estas tecnologías pueden optimizarse mediante procesos como la codigestión con residuos ricos en carbono, la aplicación de pretratamientos fisicoquímicos y el uso de micronutrientes traza para estimular la actividad microbiana (HABAGIL et al., 2020; SGANZERLA et al., 2023).

La evidencia científica ha mostrado resultados prometedores: en Cádiz, la codigestión de vinazas con lodos aumentó la productividad de metano en un 45% (Sganzerla et al., 2023); en Varberg, Suecia, la adición de oligoelementos mejoró la eficiencia del proceso metanogénico (Habagil et al., 2020); y en Francia, la fermentación oscura en reactores de membrana alcanzó tasas de producción superiores a 130 mL H<sub>2</sub>/L/h sin necesidad de un inóculo constante (RENAUDIE et al., 2021). Sin embargo, persisten limitaciones tecnológicas, como el alto consumo de energía, la necesidad de infraestructura especializada y la falta de estabilidad del proceso en sistemas a escala real.

Este trabajo tiene como objetivo analizar críticamente las tecnologías desarrolladas en los últimos años para la producción de biogás e hidrógeno verde a partir de lodos residuales e identificar sus principales barreras técnicas, económicas y operativas. Se espera, así, contribuir al conocimiento comparativo sobre el desempeño, la viabilidad y el potencial de estas tecnologías en contextos globales.

## 2. MATERIAL AND METHODS

Para el presente trabajo de revisión, se propuso un tema de investigación relacionado con la búsqueda de tecnologías para la producción de biogás y biohidrógeno y se identificaron las bases de datos académicas Scopus y Web of Science (WoS).

Para obtener investigaciones científicas validadas por expertos. Posteriormente, se planteó la metodología PIOC y su pregunta: ¿Mediante qué tecnologías se logra aprovechar

los lodos en PTAR para la producción de biogás y biohidrógeno? En función de ello, se generaron 16 palabras clave a partir del tema a tratar y se distribuyeron entre los componentes de la metodología (Tabla 1). Para ello, se formuló una pregunta para cada una y se realizó una búsqueda de artículos con marcos teóricos específicos. En ambas plataformas de búsqueda se consideraron criterios de inclusión, exclusión y eliminación para el desarrollo de un filtro de búsqueda (Tabla 2).

Para la búsqueda en Scopus, se utilizó como base las palabras claves de la Tabla I, lo cual dio como resultado la ecuación de búsqueda de la investigación: ( TITLE-ABS-KEY ( sludge OR "industrial sludge" OR "sewage sludge" OR "biosolids" OR "sediments" ) AND TITLE-ABS-KEY ( bioremediation OR "Anaerobic digestion" OR "microbial electrolysis" OR "Industrial bioprocesses" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "biogas" OR "green hydrogen" OR generation ) AND TITLE-ABS-KEY ( "treatment plant" OR "purification plants" OR "sewage processing plant" ) ) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND ( LIMIT-TO ( OA , "all" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) ) obteniéndose 261 resultados. Así mismo, la cadena de búsqueda aplicada en WoS es la siguiente: "Sludge" OR "sewage sludge" OR "mixed sludge" OR "effluent" (Topic) and technology OR "technological transitory" OR "Anaerobic digestion" OR "microbial electrolysis" OR "dark fermentation" (Topic) and "Biohydrogen" OR "Green hydrogen" OR biogas or generation (Topic) and "industrial treatment plants" OR "Treatment plant" OR "purification plants" OR "sewage processing plant" (Topic) and 2024 or 2023 or 2022 or 2021 or 2020 (Publication Years) and Article (Document Types) and English (Languages) and All Open Access (Open Access), identificándose 146 resultados.

Tabla 1. Metodología PIOC.

Table 1. Methodology PIOC.

Preguntas PIOC	
P (pregunta)	Sludge, sewage sludge, mixed sludge, effluent ¿Qué inconvenientes genera la deficiente gestión de lodos en las plantas?
I (intervención)	Technology, technology transition, Anaerobic digestion, microbial electrolysis, dark fermentation ¿Qué tecnologías se han desarrollado para la producción de biogás y biohidrógeno a partir de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales?
O (resultado)	Biogas, generation, bio-hydrogen, green hydrogen ¿Qué potencial tienen los lodos para la producción de biogás y/o biohidrógeno?
C (contexto)	Industrial treatment plants, treatment plant, sewage processing plant ¿Qué barreras enfrentan las plantas de tratamiento de aguas residuales para convertir lodos en biogás y biohidrógeno?

Tabla 2. Criterios de exclusión e inclusión.

Table 2. Exclusion and inclusion criteria.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
C.I.1 Artículos originales a texto completo publicados en revistas	C.E.1: No aplicación directa de lodos
C.I.2 Estudios publicados en inglés.	C.E.2: Análisis no asociados a la producción
C.I.3 Tecnologías complementarias que ayudan a la producción de biogás	C.E.3: No hay indicadores relevantes para la producción
	C.E.4: No presentan o no describen tecnologías asociadas
	C.E.5: Otros

A continuación, se aplicó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para recopilar y seleccionar artículos para su análisis posterior. Esta se inició con la eliminación de publicaciones duplicadas, lo que redujo el total de 408 a 300. Luego, se depuraron 160 artículos mediante la exclusión de aquellos cuyo título y/o resumen no cumplían los criterios de inclusión. Entre los estudios que presentaron complicaciones en su obtención (20), quedaron 130 para determinar su elegibilidad. Por último, se seleccionaron 64 artículos (Figura 1) con base en los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla II para su revisión posterior.

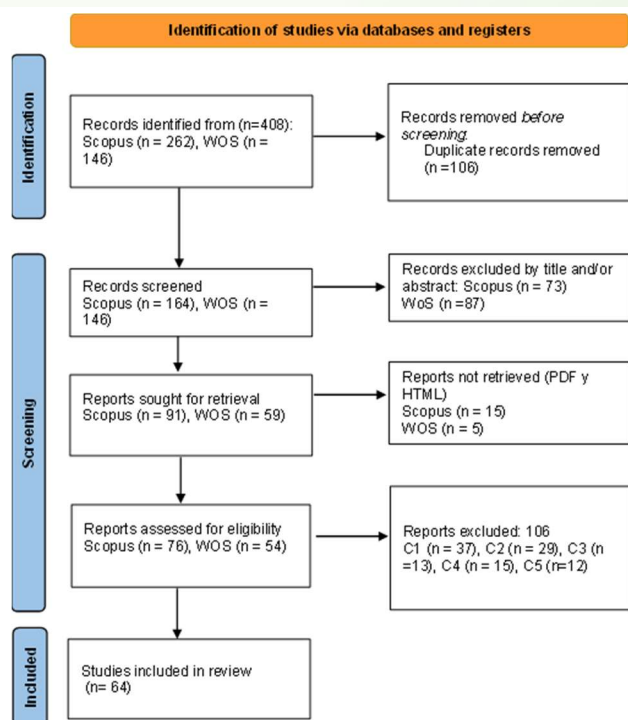


Figura 1. La metodología PRISMA se basa en tecnologías para la producción de biogás y biohidrógeno.

Figure 1. Metodología PRISMA methodology is based on technologies for the production of biogas and biohydrogen.

### 3. RESULTADOS

En diferentes estudios se han identificado diversas tecnologías en el proceso de tratamiento de lodos y producción de biocombustibles (biogás y biohidrógeno), en las que se emplean medios de producción, es decir, equipos, sistemas propuestos y herramientas que incrementan la degradación de los lodos.

Varios países a nivel mundial presentan inconvenientes en la gestión de lodos que comprometen la sostenibilidad económica, técnica y ambiental de las PTARs, pues se han identificado distintos aspectos negativos al investigar los tratamientos y pretratamientos de lodos, como el estado de los lodos, sus componentes y los costos operativos.

Se han identificado 18 países, mostrados en la Figura 2, que han considerado problemas asociados a los lodos al emplearlos como sustratos para obtener biogás y biohidrógeno. Un estudio en Eslovenia destaca que la eliminación de lodos activados residuales llega a consumir hasta el 60% de los costos operativos totales de las EDAR (ZUPANC et al., 2023), donde un estudio en España confirma que se realiza la incineración de más de 7 millones de toneladas anuales de lodos (Ronda et al., 2023) y la investigación hecha en Kuwait menciona que se realiza para reducir su alto nivel de humedad (mayor al 90%) (Alshawaf et al., 2021) y presentando un bajo contenido de sólidos volátiles (SV) de entre 1 y 2% antes del procesos de tratamiento, la cual fue presentado en una investigación de Chile (MONTALVO et al., 2020).

Polonia, que tiene cinco estudios, menciona que los lodos presentan características de fluido no newtoniano (Dzido et al., 2024), (Masloń et al., 2024) y una variabilidad en su composición, con metales pesados (Górka, Cimochoicz-Rybicka; Poproch, 2022), compuestos orgánicos como medicamentos (Kazimierowicz et al., 2022a), lignina (Mukawa et al., 2022) y compuestos lignocelulósicos,

como las de PTAR de la industria papelera en Brasil (FIOREZE et al., 2022). Asimismo, en otro estudio de Eslovenia, se identificaron componentes como el bisfenol A (BPA) y microplásticos de PVC (Lekše et al., 2024a), patógenos y genes de resistencia antibiótica (TAPSOBA et al., 2020; JIANG et al., 2023), los cuales fueron presentados en estudios de Tanzania y China, respectivamente, además de que la carencia de oligoelementos (Fe, Ni, Co) limita la actividad microbiana, posteriormente empleada en la producción de metano (CH<sub>4</sub>), la cual fue mencionada en una investigación de Japón (ZHU et al., 2021).

Distribution of studies by country related to challenges in sludge management



Figura 2. Distribución de los estudios por país en relación con los retos de la gestión de lodos.

Figure 2. Distribution of studies by country related to challenges in sludge management.

Del mismo modo, Campo et al. (Campo et al., 2024) comenta, en su artículo publicado en Italia, que los lodos activos residuales presentan una composición compleja y baja biodisponibilidad debido a sustancias poliméricas extracelulares, lo que dificulta su degradación, mientras que, en la evaluación de plantas del Reino Unido, los lodos presentaban variabilidad entre los lodos primarios y activados, lo que complica la aplicación de tratamientos estandarizados (LIU; SMITH, 2022). Además, trabajos realizados en Italia, Panamá y Malasia encontraron relaciones C/N desfavorables, estructuras celulares resistentes, inhibidores como el H<sub>2</sub>S y sensibilidad a los tiempos de retención (CHIAPPERO et al., 2021; GHALEB et al., 2021; DEAGO et al., 2023). Finalmente, la fluctuación en la cantidad y la calidad del lodo, influida por hábitos y condiciones operativas, intensifica estos desafíos, especialmente en regiones de alta producción como Egipto (EL-KEBEER et al., 2024).

Las tecnologías utilizadas para el tratamiento de lodos buscan mejorar la eficiencia en la obtención de recursos energéticos y reducir los residuos y han permitido identificar equipos y configuraciones especializados para optimizar el proceso de producción. La primera es la configuración experimental, en la que los autores han diseñado un esquema gráfico o diagrama de flujo que representa la organización del experimento, mientras que la configuración de laboratorio consiste en enumerar los elementos empleados en el ensayo de obtención de biocombustibles.

Según la Tabla 3, se han identificado cuatro tecnologías relevantes estudiadas en el laboratorio. En primer lugar, se encuentran los POA, en los que se identificó la ozonización, que, además de estudiar la inhibición por microplásticos en la producción de biogás (Lekše et al., 2024a; Ngo et al., 2022) y en una mezcla de lodo con lixiviados (BWAPWA, 2021). Con ello, se habían empleado generadores de ozono, ya sea con O<sub>2</sub>, y equipos que inyectaban dosis de ozono en las

## Tecnologías para la producción de biogás y biohidrógeno a partir de lodos en plantas de tratamiento

muestras a tratar, ya que el ozono reacciona con compuestos orgánicos y sintéticos, oxidándolos y haciéndolos más accesibles a los microorganismos, lo que resulta efectivo para aumentar la eficiencia de la eliminación de contaminantes. Sin

embargo, deben medirse las dosis para evitar la destrucción de los microorganismos implicados en la producción de metano.

Tabla 3. Tecnologías identificadas en el proceso de pretratamiento de lodos de laboratorio.

Table 3. Technologies identified in the laboratory sludge pretreatment process.

Tecnología	Medio de producción	Fuente
Proceso de Oxidación Avanzada (POA)	Configuración experimental con reactivos Fenton, con ozono y de laboratorio	(Heng et al., 2021; Kazimierowicz et al., 2022; Ngo et al., 2022; Siddiqui et al., 2023; Jamshidinasirmahale et al., 2024; Lekše et al., 2024)
Hidrólisis térmica (HT)	Configuración experimental THP (Thermal Hydrolysis Process), reactor Parr y reactor presurizado	(Tapsoba et al., 2020; Aragon-Briceño et al., 2023; Carranza Muñoz et al., 2024; Ngo et al., 2024)
Carbonización hidrotermal (CHT)	Reactor a presión	(Kosińska et al., 2024)
Cavitación hidrodinámica (HC)	Configuración experimental de cavitación y desintegrador hidrodinámico	(Zupanc et al., 2023; Dzido et al., 2024)
Otras	Configuración experimental, de laboratorio y reactor presurizado con agitador	(Ahn; Chang, 2021; Chmielewski et al., 2021; Fioreze et al., 2022; Rashvanlou et al., 2021)

Mientras que el empleo de tecnología electroquímica en lodos de PTAR de un campus universitario y de reactivos Fenton en lodos farmacéuticos y de mataderos buscaba mejorar el rendimiento mediante el aumento de la demanda química de oxígeno (DQO), la reducción de SV (Heng et al., 2021; Siddiqui et al., 2023) y la eliminación de contaminantes como fármacos (KAZIMIEROWICZ et al., 2022). La aplicación de esta tecnología altera las propiedades fisicoquímicas debido al elevado potencial de oxidación de los reactivos presentes en la materia orgánica.

Además, tenemos los procesos hidrotermales, donde se encuentran la hidrólisis térmica, que emplea reactores presurizados de acero inoxidable y un reactor Parr discontinuo, y la carbonización hidrotermal, que utiliza un reactor a presión. Estos operan a una temperatura entre 100 °C y 250 °C, la cual se aplicará si se busca producir solo biogás o biogás e hidrocarburos. (ARAGON-BRICEÑO et al., 2023; KOSSIŃSKA et al., 2024). Por otro lado, se emplea la configuración experimental HTP, que incluye un tanque de descarga y una planta piloto THP, la cual opera a temperaturas entre 100 y 165 °C, para obtener ácidos grasos volátiles, que son digeridos por microorganismos metanógenos.

La cavitación hidrodinámica se utiliza como pretratamiento porque provoca la ruptura de los coagulados de los lodos residuales, por lo que se diseñan dispositivos basados en modelos matemáticos y computacionales. Por ello, se propusieron diseños en los que la configuración experimental de cavitación presenta siete elementos que mejoran la generación de cavitación y el rendimiento de bombeo (Zupanc et al., 2023), así como un desintegrador hidrodinámico empleado para simular computacionalmente el flujo de lodos (DZIDO et al., 2024). Así, se busca la velocidad de rotación óptima para maximizar el rendimiento del biometano.

También se identificaron tecnologías poco empleadas en el pretratamiento. Se consideraron los pretratamientos convencionales, así como el uso de un molino centrífugo y de un reactor presurizado con agitador, con solución alcalina, a una temperatura entre 150 y 175 °C, en lodos de pasta kraft de eucalipto, para evaluar la influencia de los parámetros físicos en la producción de biogás (FIOREZE et al., 2022). Asimismo, se presentan tecnologías innovadoras, como el

uso del acelerador de electrones, lo que indica que se pueden obtener aproximadamente 140 litros de biogás por 1 kilogramo de sólidos suspendidos totales (Chmielewski et al., 2021), así como la aplicación de un pretratamiento combinado, como el uso de ultrasonidos y enzimas, que ayuda a mantener estables las comunidades bacterianas a lo largo del proceso. (Rashvanlou et al., 2021) y la solubilización mecánica y la hidrólisis térmica, donde el uso combinado mejoró la eficiencia de disolución del lodo y el tratamiento térmico aumentó el contenido de compuestos orgánicos solubles en el lodo mezclado (AHN; CHANG, 2021).

Por otro lado, también se han identificado tecnologías empleadas en plantas piloto y en PTAR reales. En el caso de los PTAR reales, se han evaluado distintos pretratamientos, como el uso de aceleradores de electrones, debido a su influencia en los parámetros físicos de los lodos y en la obtención de fertilizante y energía (CHMIELEWSKI et al., 2021). Mientras que en países de Europa como Polonia, en una de sus plantas donde se tratan lodos residuales municipales, 8684 Mg de sólidos secos producen 3.276.497 Nm<sup>3</sup> de biogás mediante la implementación de hidrólisis térmica (Mukawa et al., 2022), mientras que en 4 plantas de Reino Unido, presentan diferencias en cuanto a la producción, pues con un alto contenido de SV y otras con alto contenido de fracción orgánica de los lodos, mediante el calentamiento, pasteurización, hidrólisis convencional e hidrólisis enzimática lograron la remoción de grasa y celulosa, logrando el aumento de biogás (LIU; SMITH, 2022). Esto evidencia una relación entre la tecnología de pretratamiento y la obtención de biogás.

Pocas plantas piloto han empleado pretratamientos. Así pues, la escalabilidad de una planta piloto en Suecia, mediante la hidrólisis térmica, incrementa la producción (Carranza-Muñoz et al., 2024), mientras que, en Italia, con la propuesta de escenarios de PTAR, se identifica la reducción de lodos de más del 60% (SCRINZI et al., 2023)

En las tecnologías de tratamiento de lodos mostradas en la Tabla 4, se revisaron ensayos de laboratorio y de prueba piloto que no se emplearon en el PTAR. Se utilizaron distintos reactores con capacidades variadas. Para la DA, también llamada monodigestión de lodos, se emplearon reactores de tanque agitado continuamente (CSTR) (Liu; Smith, 2022); se emplearon soluciones ácidas y alcalinas para

mantener el equilibrio del lodo antes del proceso de DA (De Sousa et al., 2021), y en el reactor de mezcla de vidrio se empleó una temperatura inferior a 50 °C (JIANG et al., 2023). También se presentaron al reactor anaeróbico con deflectores (ABR), complementado con electrodos (Wang et al., 2020), y al reactor de membrana anaeróbica (AnMBR)

(Tauber et al., 2021), donde la mayoría de ellos fueron fabricados en acero inoxidable, ya que estos equipos están diseñados especialmente para soportar los cambios físicos y químicos durante la transformación de lodos en digestato y luego en composta.

Tabla 4. Tecnologías identificadas en el proceso de tratamiento para la producción de biogás

Table 4. Technologies identified in the treatment process for biogas production

Tecnología	Medio de producción	Fuente
Digestión anaerobia (DA)	Configuración experimental, de laboratorio, reactores de membrana, de mezcla y fermentador	(Öfverström et al., 2020; Vítéz et al., 2020; Wang et al., 2020; Tauber et al., 2021; De Sousa et al., 2021; Hubert et al., 2022; Jiang et al., 2023; Ferrer et al., 2024; Sengur et al., 2024) (Habagil et al., 2020; Wang et al., 2020; Zahedi et al., 2020; Ghaleb et al., 2021; Szaja et al., 2021; Zhu et al., 2021; Auxiliadora López et al., 2023; Aromolaran et al., 2023; Prask et al., 2023; Sganzerla et al., 2023; Ahmed et al., 2024)
Codigestión anaerobia (Co-DA)	Configuración experimental, de laboratorio y reactores SCTR	

Generalmente se han realizado configuraciones experimentales y/o de laboratorio para comprobar hipótesis propuestas. Se ha empleado el método de aplicación al vacío para eliminar el CO<sub>2</sub> de los lodos (Sengur et al., 2024), evaluar la variación de los microorganismos metanogénicos y cómo esta influye en la producción y la calidad del biogás (contenido de sulfuro de hidrógeno – H<sub>2</sub>S) a distintas temperaturas (VÍTÉZ et al., 2020). Mientras que otras investigaciones emplearon recursos preexistentes, añadiendo controladores de temperatura Arduino (Campo et al., 2024) e incubadoras para mantener los microorganismos del inóculo (Öfverström et al., 2020), los sistemas automatizados, como el Sistema de Prueba de Potencial Metanogénico Automático (AMPTS) (HUBERT et al., 2022).

Adicionalmente, se han empleado herramientas complementarias en la DA para optimizar la producción de biometano. Se encontró que el machine learning (ML), mediante la arquitectura denominada Temporal Fusion Transformer (TFT), permite extraer información relevante, mantener las incertidumbres dentro de rangos aceptables y lograr una predicción adecuada de la tasa de rendimiento de biogás (SAPPL et al., 2023). Además, se empleó la dinámica de fluidos computacional (CFD) con el objetivo de optimizar la eficiencia del flujo de lodos para el rendimiento energético y de metano (Abdelrahman et al., 2023), como el modelo I, que, en condiciones base, generaba un equivalente de metano de 447 kg/d con un flujo de recirculación de 0.015 kg/s (DABIRI et al., 2023).

Además, se encuentra la Co-DA que se caracteriza por el uso de sustratos adicionales o cosustratos para aumentar la producción de biogás. Entre los cosustratos hay residuos líquidos y sólidos, para los cuales el reactor más común es el de tanque agitado continuo (CSTR), ya sea empleado de forma independiente (Habagil et al., 2020) o en una configuración de ensayo de laboratorio (SZAJA et al., 2021; ZHU et al., 2021). Asimismo, emplean los mismos equipos utilizados en la DA, ya que su finalidad es tratar lodos a temperaturas entre 30 °C y 60 °C para dar características estables a bacterias y microorganismos encargados de la degradación de sustratos y la producción de biometano (AHN; CHANG, 2021; HENG et al., 2021; ARAGON-BRICEÑO et al., 2023; SCRINZI et al., 2023; CARRANZA MUÑOZ et al., 2024; KOSSINSKA et al., 2024b; NGO et al., 2024; SENGUR et al., 2024).

Para producir biohidrógeno, también se ha empleado la tecnología Co-DA, realizada en dos etapas, con configuración experimental y el uso de un reactor CSTR (Tena et al., 2021; Auxiliadora López et al., 2023), como se muestra en la Tabla 5. Por último, en la fermentación oscura se emplearon configuraciones de laboratorio desarrolladas en la fermentación del lodo y la evaluación del flujo de gas para prevenir fugas (Barghash et al., 2022), así como configuraciones experimentales en las que, principalmente, los reactores emplean membranas de ultrafiltración de fibra hueca para un control preciso de la temperatura (El-kebeer et al., 2024) y el mezclado para optimizar la separación gas – líquido y maximizar el rendimiento (RENAUDIE et al., 2021).

Tabla 5. Tecnologías identificadas en el proceso de tratamiento para la producción de biohidrógeno.

Table 5. Technologies identified in the treatment process for biohydrogen production.

Tecnología	Medio de producción	Fuente
Co-DA	Sistema de reactores discontinuo y configuración de laboratorio	(Auxiliadora López et al., 2023; Tena et al., 2021)
Fermentación oscura (FO)	Configuración experimental, configuración de laboratorio y reactor discontinuo	(Barghash et al., 2022; El-kebeer et al., 2024), (Renaudie et al., 2021)

Mediante el uso de estos dispositivos, se identificaron parámetros como la producción de biogás, el rendimiento específico de biogás, medido en mL de biogás por gramo de sólidos volátiles (mL/gVS), y el contenido de metano en el biogás. Los datos de la literatura sobre la obtención de biogás e hidrógeno presentan variabilidad que depende de las condiciones en las que se aplicaron los lodos.

En la Tabla 5 se observa el potencial de la digestión y la cogestión anaerobias, medido mediante un índice teórico de producción de biogás basado en el parámetro BMP (potencial bioquímico de metano), para diferentes tipos de lodo. En un estudio se mostró un rendimiento de 163 mL CH<sub>4</sub>/gVS, menor en cuanto a DA, proveniente de residuales y cuyo rendimiento ajustado se debió a que no se consumieron los SV (Campo et al., 2024), y de 175 mL CH<sub>4</sub>/gVS, debido a que se emplearon enzimas en la monodigestión de lodos provenientes de una PTAR vinícola

(AVILA et al., 2021). Además, se identificaron valores intermedios de rendimiento entre 240 y 253 mL CH<sub>4</sub>/gVS, en los que, mediante procesos como el de vacío, el pretratamiento para aumentar la solubilización de lodos (Heng et al., 2021) y la neutralización de lodos, se obtuvo biogás con 87% de metano (SENGUR et al., 2024).

Asimismo, se identificó un rendimiento de 300 mL CH<sub>4</sub>/gVS al emplear una mezcla de lodos primarios y residuales con un 65% de metano (Ferrer et al., 2024), mientras que al usar ocre como aditivo a una concentración de 1 g Fe/L, se puede producir 344 mL CH<sub>4</sub>/gVS (Öfverström et al., 2020). Esto demuestra el gran impacto de

las condiciones operativas y de los aditivos en la eficiencia de la producción de biogás. Valores entre 400 y 806 mL CH<sub>4</sub>/gVS, donde los resultados se deben al tratamiento de sustratos pocos conocidos como la mezcla de lodo deshidratado con agua desionizada y otra proveniente de PTAR con alto contenido lácteo, la cual presentaba la reducción de sólidos volátiles, la alta conversión de proteínas a aminoácidos (Jiang et al., 2023) y una mayor concentración de hierro y baja concentración de fósforo (Hubert et al., 2022), por lo que la presencia de elementos traza como el hierro pueden presentar mayor rendimiento.

Tabla 6. Parámetro relacionado con el rendimiento específico de biogás a partir de lodos.  
Table 6. Parameter associated with the specific biogas yield from sludge.

Lodos	Rendimiento		Fuente
	Potencial bioquímico de metano		
	DA	Co-DA	
Lodos residuales y microalgas (Co-DA)	163 mL CH <sub>4</sub> /gVS – 175 mL CH <sub>4</sub> /gVS	160 mL CH <sub>4</sub> /gVS	(Avila et al., 2021; Campo et al., 2024)
Lodos activados; espuma de aguas residuales (Co-DA)	240 mL CH <sub>4</sub> /gVS – 253 mL CH <sub>4</sub> /gVS	408.4 mL CH <sub>4</sub> /gVS	(Aromolaran et al., 2023; De Sousa et al., 2021; Sengur et al., 2024)
Lodos – A, primarios y residuales; residuos municipales (Co-DA)	300 mL CH <sub>4</sub> /gVS	404 mL CH <sub>4</sub> /gVS	(Ferrer et al., 2024; Habagil et al., 2020)
Lodos de depuradora; residuos sólidos y líquidos (Co-DA)	344 mL CH <sub>4</sub> /gVS	55.39 mL CH <sub>4</sub> /gVS – 664.8 mL CH <sub>4</sub> /gVS	(Ahmed et al., 2024; Auxiliadora López et al., 2023; Öfverström et al., 2020; Prask et al., 2023; Szaja et al., 2021; Zahedi et al., 2020; Zhu et al., 2021)
Otros lodos	439 mL CH <sub>4</sub> /gVS – 806 mL CH <sub>4</sub> /gVS	–	(Hubert et al., 2022; Jiang et al., 2023)

6

Ahora, mediante pretratamientos, se observan valores que oscilan entre 400 y 600, entre los que destacan la hidrólisis térmica (Ngo et al., 2024) y el uso de electrofenton (SIDDIQUI et al., 2023). Sin embargo, el uso de un reactor AOP (proceso de oxidación avanzada) resultó muy valioso al aplicar reactivos Fenton/similares a Fenton (Kazimierowicz et al., 2022).

En la Co-DA también se obtuvo un rendimiento inferior a 300, con un mínimo de 55,39 mL CH<sub>4</sub>/gVS, empleando vinaza (AUXILIADORA LÓPEZ et al., 2023). Luego, cosustratos como microalgas previamente tratadas con enzimas (Avila et al., 2021) triplicaron el rendimiento y la muestra con presencia de lodos y residuos sólidos urbanos, en proporción 75:25, fue la que presentó el mayor rendimiento. Además, en plantas de Escocia y Polonia se obtuvieron rendimientos de CH<sub>4</sub> de 290 a 404 mL/gVS, donde el valor más alto tuvo un tiempo de prueba de más de 100 días (Habagil et al., 2020; Szaja et al., 2021; Thakur et al., 2022; Wehner et al., 2021), y al tratar lodos de depuradora con aguas residuales vinícolas se pueden obtener hasta 400 mL CH<sub>4</sub>/gVS en 20 días (ZAHEDI et al., 2020).

Otro tipo de residuo sólido empleado son los que contienen celulosa como los de paja de arroz y papel, la cual obtuvieron valores medio de biogás con proporción de biogás superior a 61% (ZHU et al., 2021; AHMED et al., 2024). Sin embargo, al usar residuos líquidos como jugo de sorgo al 5% se obtuvo un rendimiento máximo de 664.8 mL CH<sub>4</sub>/gVS, debido a que no se emplearon reactores comunes y los lodos fueron tratados según la norma estándar alemana (Prask et al., 2023), mientras que la mezcla de cosustratos sólidos y líquidos obtuvo 408.4 mL CH<sub>4</sub>/gVS, lo que evidencia que esta mezcla puede obtener resultados positivos.

Además, en otros estudios se aplicaron pretratamientos térmicos, como la hidrólisis térmica del cosustrato ganadero (Tapsoba et al., 2020) y el pretratamiento termoalcalino de residuos de papel (Fioreze et al., 2022), lo que mostró una producción de biogás con una proporción superior al 65% de metano. Esto demuestra que, con la adición de cosustratos, se pueden obtener rendimientos similares a los de la DA sin pretratamiento.

En cuanto a la producción de biohidrógeno, la fermentación oscura mostró el valor más alto, 64.8 mL/g VS, la cual se realizó con lodos pretratados térmicamente y a escala piloto, mientras que con lodos mixtos pretratados mecánicamente se obtuvo un rendimiento de solo 2.9 mL H<sub>2</sub>/g VS (Thakur et al., 2024), como se muestra en la Tabla 7. Asimismo, en la Co-DA se obtuvieron valores de 17.92 y 45.79 mL H<sub>2</sub>/gVS debido a que se realizaron en dos fases simultáneas, mientras que 22.9 mL H<sub>2</sub>/gVS se obtuvieron en un solo estadio y en condiciones normales de laboratorio.

Tabla 7. Parámetro relacionado con el rendimiento específico de biohidrógeno a partir de lodos.

Table 7. Parameter associated with the specific yield of biohydrogen from sludge.

Lodos	Rendimiento		Fuente
	Potencial bioquímico de hidrógeno		
	Co-DA	Fermentación oscura	
Lodos de depuradora con vinaza	17.92 mL H <sub>2</sub> /gVS – 22.9 mL H <sub>2</sub> /gVS	-	(Auxiliadora López et al., 2023; Tena et al., 2021)

Lodos residuales y activados	2.9 mL	(Martínez-Fraile et al., 2024; El-kebeer et al., 2024)
	H <sub>2</sub> /gVS –	
	64.8 mL H <sub>2</sub> /gVS	

Según la figura 3, la gestión del sustrato es crucial para la eficiencia de la producción de biogás y biohidrógeno a partir de lodos. Según Mukawa et al. (2022) y Górká et al. (2022), un manejo adecuado del sustrato asegura una mayor conversión de la materia orgánica en biogás y biohidrógeno. La falta de control de la composición de los lodos puede disminuir la actividad microbiana y afectar los rendimientos energéticos. El consumo energético sigue siendo un desafío en estos procesos. Chiappero et al. (2021) señalan que la DA convencional requiere niveles elevados de energía. Sin embargo, tecnologías como la hidrólisis térmica pueden reducir este consumo al mejorar la digestibilidad de los lodos, aunque no lo eliminan por completo.

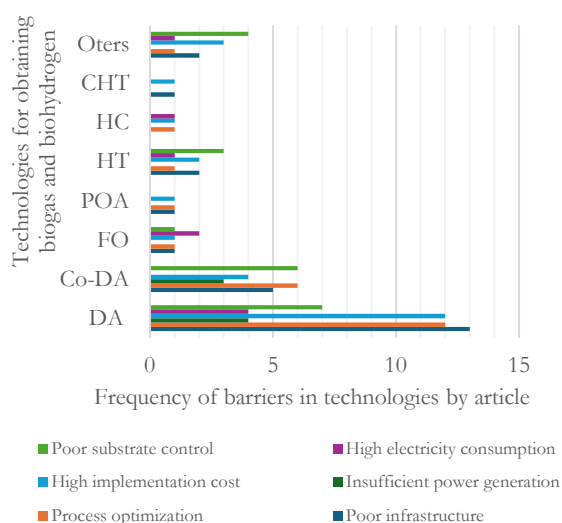


Figura 3. Obstáculos en las tecnologías para la obtención de biogás y biohidrógeno.

Figure 3. Barriers in technologies for obtaining biogas and biohydrogen.

El alto costo de implementación es otro obstáculo importante. Como señalan Chiappero et al. (2021), la infraestructura necesaria para los procesos de digestión y pretratamiento implica costos elevados, lo que limita su adopción, especialmente en PTAR de menor escala. En cuanto a la producción de energía suficiente, los estudios de Górká et al. (2022) y de Aragon-Briceno et al. (2023) muestran que la Co-DA mejora significativamente la producción de biogás, incrementándola hasta un 20% cuando se combinan otros residuos con los lodos de la depuradora. La optimización de procesos es clave para mejorar la eficiencia. Mukawa et al. (2022) indican que la integración de tecnologías emergentes, como la hidrólisis térmica, facilita la digestión de los lodos, aumenta la producción de biogás y reduce los costos operativos.

La infraestructura deficiente sigue siendo una barrera significativa. Aragón Briceno et al. (2022) destacaron que muchas PTAR carecen de la infraestructura necesaria para implementar tecnologías avanzadas de digestión y pretratamiento, lo que limita su adopción generalizada.

Finalmente, dentro del ítem “otros”, se debe considerar la limitada adopción de tecnologías emergentes como el machine learning y la dinámica de fluidos computacional

(CFD). Estas herramientas han demostrado ser útiles para predecir la producción de biogás y optimizar procesos mediante simulaciones (Dabiri et al., 2023; Sappl et al., 2023), pero su implementación real se ve obstaculizada por la falta de personal capacitado, de infraestructura tecnológica y de validación en condiciones operativas.

#### 4. DISCUSIÓN

Polonia es el país con más estudios dedicados al estudio de lodos para la producción de biocombustibles líquidos, y en 3 de ellos se han tratado lodos provenientes de empresas como las PTAR farmacéuticas, las bodegas de vino y las agrotexiles. Además, se presentaron otros lodos provenientes de plantas municipales y urbanas que procesan aguas residuales domésticas y de algunas industrias. Esto contribuyó a la alta variabilidad del rendimiento, en la que algunos rendimientos bajos se debieron a la presencia de comunidades bacterianas (Aromolaran et al., 2023) y a la eliminación de bacterias consumidoras de H<sub>2</sub> (EL-KEBEER et al., 2024).

La presencia de compuestos celulósicos tiene un gran potencial en la producción de biogás con alto contenido metano, ya sea usando lodos provenientes de fábricas de papel (Fioreze et al., 2022; Thakur et al., 2024) o usando cosustratos como residuos de papel o residuos sólidos como la paja de arroz (Zhu et al., 2021; Ahmed et al., 2024) donde la degradación de dichos compuestos contribuye su accesibilidad a los microorganismos. Asimismo, otros compuestos complejos, como fármacos, pueden inhibir la producción de biogás mediante la DA (Busto et al., 2020); sin embargo, mediante el pretratamiento POA se puede evitar dicha inhibición, lo que permite alcanzar altos valores de rendimiento (KAZIMIEROWICZ et al., 2022).

En el proceso de producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, múltiples investigaciones coinciden en que este se realiza mediante procesos de pretratamiento y tratamiento de lodos, mientras que en otros estudios solo se aplica el tratamiento. Pocos se aplican directamente en PTAR o en plantas piloto debido a la falta de estudios integrados que incluyan el diseño de sistemas de flujo de lodos y de gas, los procesos operativos y el análisis del ciclo de vida, con el fin de identificar y evaluar los impactos ambientales y económicos.

Un estudio considera que la digestión anaeróbica es útil para la obtención de biohidrógeno, pero plantea desafíos tecnológicos para optimizar la relación carbono: nitrógeno (C: N) en los lodos (BWAPWA, 2021). Asimismo, esta es la tecnología más consolidada para la estabilización de materia orgánica y la producción eficiente de metano, aunque su eficacia varía según las condiciones operativas. La codigestión anaerobia (Co-DA) incrementa su potencial al incorporar cosustratos, pero enfrenta limitaciones debido a barreras logísticas, económicas y de control de proceso.

Las tecnologías de pretratamiento (hidrólisis térmica, oxidación avanzada, cavitación hidrodinámica) mejoran la biodegradabilidad de los lodos, pero su adopción se ve limitada por su alto consumo energético y su complejidad operativa. Sin embargo, solo se ha demostrado que la codigestión anaerobia puede superar los rendimientos de los lodos en la producción de biohidrógeno (Reyna-Gómez et al., 2021; Auxiliadora López et al., 2023), así como en la obtención de H<sub>2</sub> y otros gases mediante tecnologías convencionales (RONDA et al., 2023). Esto evidencia que hay más de una tecnología capaz de producir biohidrógeno, además de la fermentación oscura.

Por otro lado, también se puede obtener una mayor producción de metano mediante la conversión del CO<sub>2</sub> residual del biogás, junto con hidrógeno verde obtenido a partir de la electrólisis de aguas residuales de PTAR farmacéuticas y agrot textiles (debido a su alto contenido de contaminantes), en metano sintético o en electrocombustibles. Sin embargo, sería mucho más costoso debido al uso de energías renovables y electroscaldadores para la electrólisis del agua (Tapsoba et al., 2020; Kazimierowicz et al., 2022; Rusmanis et al., 2023), en comparación con el empleo exclusivo de reactores y paneles solares (BARGHASH et al., 2022).

## 5. CONCLUSIONES

Los lodos de las PTAR representan un valioso recurso energético que puede aprovecharse mediante procesos como la digestión y la codigestión anaerobias. La producción de biogás y biohidrógeno a partir de estos lodos no solo facilita una gestión más eficiente de los residuos, sino que también contribuye a la generación de energía renovable y a la mitigación de los impactos ambientales asociados a su disposición.

La gestión inadecuada de los lodos genera inconvenientes significativos, como el aumento de los costos operativos de las PTAR, la acumulación de residuos difíciles de tratar y el impacto ambiental derivado de la liberación de metano y otros gases contaminantes. Los lodos contienen una mezcla compleja de contaminantes, incluidos metales pesados y compuestos orgánicos, lo que dificulta su tratamiento y su adecuada disposición. Sin embargo, estos lodos poseen un alto potencial energético, ya que contienen una cantidad considerable de materia orgánica biodegradable, lo que abre la puerta a su valorización mediante la producción de biogás y biohidrógeno.

Las tecnologías más utilizadas para la producción de biogás y biohidrógeno incluyen principalmente la digestión anaeróbica (DA) y la codigestión anaeróbica (AcoD) con residuos ricos en carbono. La fermentación oscura, una tecnología emergente, también muestra un gran potencial para la producción de biohidrógeno, aunque aún se encuentra en fase experimental. Estas tecnologías permiten convertir la materia orgánica contenida en los lodos en biocombustibles, destacándose la codigestión por su capacidad para mejorar la producción de metano y aumentar la eficiencia de los procesos de tratamiento.

El potencial de los lodos como fuente de biogás y biohidrógeno es considerable, ya que su materia orgánica puede transformarse de manera eficiente en biocombustibles mediante procesos adecuados. La codigestión, en particular, ha demostrado ser efectiva para mejorar la producción de metano, mientras que la fermentación oscura se presenta como una opción viable para la producción de biohidrógeno, un vector energético de gran valor. Sin embargo, su aprovechamiento depende de mejorar las condiciones operativas y superar las barreras tecnológicas y económicas. Las principales dificultades incluyen el alto costo de operación, la falta de infraestructura adecuada y la variabilidad en la composición de los lodos, lo que afecta la estabilidad y la eficiencia del proceso de producción de biocombustibles. Además, los lodos contienen contaminantes emergentes y metales pesados, lo que añade un desafío adicional a su tratamiento y a su conversión en fuentes de energía renovable.

## 6. REFERENCES

- AHMED, G. M.; GALAL, M. M.; ALI, S. I.; MOUSTAFA, M. H.; ABDEL-HALEIM, H. S. Enhancing biogas production through anaerobic co-digestion of thickened sewage sludge and rice straw. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, n. 6, e102726, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102726>
- AHN, J.-Y.; CHANG, S.-W. Effects of sludge concentration and disintegration/solubilization pretreatment methods on increasing anaerobic biodegradation efficiency and biogas production. **Sustainability**, v. 13, n. 22, e12887, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132212887>
- ALSHAWAF, M.; ALSULAILI, A.; ALWAEI, M.; ALLANQAWI, H. The role of biomethane from sewage sludge in the energy transition: potentials and barriers in the Arab Gulf States power sector. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, e10275, 2021. <https://doi.org/10.3390/app112110275>
- ARAGON-BRICEÑO, C. I.; ROSS, A. B.; CAMARGO-VALERO, M. A. Strategies for the revalorization of sewage sludge in a wastewater treatment plant through the integration of hydrothermal processing. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, n. 1, p. 105-126, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01856-0>
- AROMOLARAN, A.; SARTAJ, M.; ABDALLAH, M. Supplemental sewage scum and organic municipal solid waste addition to the anaerobic digestion of thickened waste activated sludge: biomethane potential and microbiome analysis. **Fermentation**, v. 9, n. 3, e237, 2023. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030237>
- AUXILIADORA LÓPEZ, R.; TENA, M.; SOLERA, R.; PÉREZ, M. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and wine vinasse mixtures in single-stage and sequential-temperature processes. **Fuel**, v. 348, e128531, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128531>
- AVILA, R.; CARRERO, E.; VICENT, T.; BLÁNQUEZ, P. Integration of enzymatic pretreatment and sludge co-digestion in biogas production from microalgae. **Waste Management**, v. 124, p. 254-263, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.042>
- BARGHASH, H.; ALRASHDI, Z.; OKEDU, K. E.; DESMOND, P. Life-Cycle assessment study for bio-hydrogen gas production from sewage treatment plants using solar PVs. **Energies**, v. 15, n. 21, e8056, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15218056>
- BUSTO, R. V.; ROBERTS, J.; HUNTER, C.; ESCUDERO, A.; HELWIG, K.; COELHO, L. H. G. Mechanistic and ecotoxicological studies of amoxicillin removal through anaerobic degradation systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 192, e110207, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110207>
- BWAPWA, J. K. Overview on bioconversion of domestic wastewater sewage sludge into green energy: biogas and hydrogen. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 12, n. 8, p. 232-241, 2021. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2021.12.8.1345>
- CAMPO, G.; CERUTTI, A.; ZANETTI, M.; RUFFINO, B. Feasibility of biogas upgrading at a WWTP after pretreatment application: Techno-economic assessment validation with pilot test data. **Journal of Environmental Management**, v. 370, e122780, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122780>
- CARRANZA MUÑOZ, A.; OLSSON, J.; MALOVANY, A.; BARESEL, C.; MACHAMADA-DEVAIAH, N.;

- SCHNÜRER, A. Impact of thermal hydrolysis on VFA-based carbon source production from fermentation of sludge and digestate for denitrification: experimentation and upscaling implications. **Water Research**, v. 266, e122426, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122426>
- CHIAPPERO, M.; BERRUTI, F.; MAŠEK, O.; FIORE, S. Semi-continuous anaerobic digestion of mixed wastewater sludge with biochar addition. **Bioresource Technology**, v. 340, e125664, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125664>
- CHMIELEWSKI, A. G.; SUDLITZ, M.; HAN, B.; PILLAI, S. D. Electron beam technology for biogas and biofertilizer generation at municipal resource recovery facilities. **Nukleonika**, v. 66, n. 4, p. 213-219, 2021.
- DABIRI, S.; KUMAR, P.; RAUCH, W. Integrating biokinetics with computational fluid dynamics for energy performance analysis in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 373, e128728, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128728>
- DE SOUSA, T. A. T.; MONTE, F. P. do; SILVA, J. V. do N.; LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; VAN LIER, J. B.; SOUSA, J. T. de. Alkaline and acid solubilization of waste activated sludge. **Water Science and Technology**, v. 83, n. 12, p. 2980-2996, 2021. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.179>
- DEAGO, E.; RAMÍREZ, M.; ESPINO, K.; NIETO, D.; BARRAGÁN, M.; GARCÍA, M.; GUEVARA-CEDEÑO, J. Optimizing anaerobic digestion at ambient temperatures: energy efficiency and cost reduction potential in Panama. **Water**, v. 15, n. 14, e2653, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15142653>
- DZIDO, A.; WALCZAK, J.; JANKOWSKA, H.; KRAWCZYK, P.; ÖZBAYRAM, E. G.; ŻUBROWSKA-SUDOŁ, M. Hydrodynamic disintegration effects assessment by CFD modeling integrated with bench tests. **Journal of Environmental Management**, v. 367, e121948, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121948>
- EL-KEBEER, A. A.; MAHMOUD, U. F.; ISMAIL, S.; JALAL, A. A. E.; KOWAL, P.; AL-HAZMI, H. E.; HASSAN, G. K. Maximizing bio-hydrogen and energy yields obtained in a self-fermented anaerobic bioreactor by screening of different sewage sludge pretreatment methods. **Processes**, v. 12, n. 1, e118, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12010118>
- FERRER, I.; PASSOS, F.; ROMERO, E.; VÁZQUEZ, F.; FONT, X. Optimising sewage sludge anaerobic digestion for resource recovery in wastewater treatment plants. **Renewable Energy**, v. 224, e120123, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120123>
- FIOREZE, M.; LABOTIĆ, L.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, C. M. Effects of pretreatments on the solubilization and theoretical methane production of waste activated sludge from a Brazilian eucalyptus kraft pulp mill. **BioResources**, v. 17, n. 3, p. 5300-5318, 2022.
- GHALEB, A. A. S.; KUTTY, S. R. M.; SALIH, G. H. A.; JAGABA, A. H.; NOOR, A.; KUMAR, V.; ALMAHBASHI, N. M. Y.; SAEED, A. A. H.; AL-DHAWI, B. N. S. Sugarcane bagasse as a co-substrate with oil-refinery biological sludge for biogas production using batch mesophilic anaerobic co-digestion technology: effect of carbon/nitrogen ratio. **Water**, v. 13, n. 5, e590, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13050590>
- GÓRKA, J.; CIMOCHOWICZ-RYBICKA, M.; POPROCH, D. Sludge management at the Kraków-Plaszów WWTP - case study. **Sustainability**, v. 14, n. 13, e7982, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14137982>
- HABAGIL, M.; KEUCKEN, A.; HORVÁTH, I. S. Biogas Production from food residues - the role of trace metals and co-digestion with primary sludge. **Environments**, v. 7, n. 6, e42, 2020. <https://doi.org/10.3390/environments7060042>
- HENG, G. C.; ISA, M. H.; LOCK, S. S. M.; NG, C. A. Process optimization of waste activated sludge in anaerobic digestion and biogas production by electrochemical pre-treatment using ruthenium oxide coated titanium electrodes. **Sustainability**, v. 13, n. 9, e4874, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13094874>
- HUBERT, C.; STEINIGER, B.; SCHAUM, C. Prequalification of flotation sludge for a sustainable increase in biogas production and in regard of demand-driven feeding strategy. **Journal of Environmental Management**, v. 323, e116057, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116057>
- JAMSHIDINASIRMAHALE, Z.; YAZDANBAKHSI, A.; MASOUDINEJAD, M.; ALAVI BAKHTIARVAND, N. Anaerobic co-digestion of landfill leachate and sewage sludge: Determination of the optimal ratio and improvement of digestion by pre-ozonation. **Environmental Health Engineering and Management**, v. 11, n. 1, p. 93-104, 2024. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2024.11>
- JIANG, L.; ZHANG, Y.; ZHU, Y.; HUANG, Z.; HUANG, J.; WU, Z.; ZHANG, X.; QIN, X.; LI, H. Effects of magnetic biochar addition on mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 5, e4278, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054278>
- KAZIMIEROWICZ, J.; DĘBOWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M. Effect of pharmaceutical sludge pre-treatment with Fenton/Fenton-like reagents on toxicity and anaerobic digestion efficiency. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 1, e271, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010271>
- KOSSIŃSKA, N.; GROSSER, A.; KWAPIŃSKA, M.; KWAPIŃSKI, W.; GHAZAL, H.; JOUHARA, H.; KRZYŻYŃSKA, R. Co-hydrothermal carbonization as a potential method of utilising digested sludge and screenings from wastewater treatment plants towards energy application. **Energy**, v. 299, e131456, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131456>
- LEKŠE, N.; GRIESSLER BULC, T.; ŽGAJNAR GOTVAJN, A. The potential of ozonation to reduce impact of waste sludge-entrapped microplastics to biogas production. **Ozone: Science & Engineering**, v. 46, n. 3, p. 255-266, 2024. <https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2332286>
- LIU, J.; SMITH, S. R. The link between organic matter composition and the biogas yield of full-scale sewage sludge anaerobic digestion. **Water Science and Technology**, v. 85, n. 5, p. 1658-1672, 2022. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.058>
- MARTÍNEZ-FRAILE, C.; MUÑOZ, R.; TERESA SIMORTE, M.; SANZ, I.; GARCÍA-DEPRAECT, O. Biohydrogen production by lactate-driven dark fermentation of real organic wastes derived from solid waste treatment plants. **Bioresource Technology**, v.

- 403, e130846, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130846>
- MASŁON, A.; CZARNOTA, J.; SZCZYRBA, P.; SZAJA, A.; SZULŻYK-CIEPLAK, J.; ŁAGÓD, G. Assessment of Energy self-sufficiency of wastewater treatment plants - a case study from Poland. **Energies**, v. 17, n. 5, e1164, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17051164>
- MONTALVO, S.; MARTINEZ, J.; CASTILLO, A.; HUILIÑIR, C.; BORJA, R.; GARCÍA, V.; SALAZAR, R. Sustainable energy for a winery through biogas production and its utilization: A Chilean case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 37, e100640, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100640>
- MUKAWA, J.; PAJAK, T.; RZEPECKI, T.; BANAS, M. Energy potential of biogas from sewage sludge after thermal hydrolysis and digestion. **Energies**, v. 15, n. 14, e5255, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15145255>
- ABDELRAHMAN, A. M.; ARAS, M. F.; CICEKALAN, B.; FAKIOGLU, M.; CINGOZ, S.; BASA, S.; GUVEN, H.; OZGUN, H.; OZTURK, I.; KOYUNCU, I.; VAN LIER, J. B.; VOLCKE, E. I. P.; ERSAHIN, M. E. Primary and A-sludge treatment by anaerobic membrane bioreactors in view of energy-positive wastewater treatment plants. **Bioresource Technology**, v. 351, e126965, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126965>
- NGO, P. L.; YOUNG, B. R.; BAROUTIAN, S. Impact of preozonation on biogas potential of PVC microplastics-containing waste sludge. **Global NEST Journal**, v. 25, n. 2, p. 13-19, 2022. <https://doi.org/10.30955/gnj.004300>
- NGO, P. L.; YOUNG, B. R.; BAROUTIAN, S. A novel strategy for integration of oxidation within advanced thermal hydrolysis of sludge. **Chemosphere**, v. 348, e140676, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140676>
- ÖFVERSTRÖM, S.; DAVIDSSON, Å.; HAGHIGHATAFCHAR, S.; KJERSTADIUS, H.; JANSEN, J. L. C. Waste Ochre for control of phosphates and sulfides in digesters at wastewater treatment plants with enhanced biological phosphorus removal. **Clean Technologies**, v. 2, n. 1, p. 116-126, 2020. <https://doi.org/10.3390/cleantech2010008>
- PRASK, H.; FUGOL, M.; DYJAKON, A.; GŁĄB, L.; SOWIŃSKI, J.; WHITAKER, A. The Impact of sewage sludge-sweet sorghum blends on the biogas production for energy purposes. **Energies**, v. 16, n. 5, e2105, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16052105>
- RASHVANLOU, R. B.; FARZADKIA, M.; REZAEI, A.; GHOLAMI, M.; KERMANI, M.; PASALARI, H. The influence of combined low-strength ultrasonics and micro-aerobic pretreatment process on methane generation and sludge digestion: Lipase enzyme, microbial activation, and energy yield. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 73, e105531, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105531>
- RENAUDIE, M.; DUMAS, C.; VUILLEUMIER, S.; ERNST, B. Biohydrogen production in a continuous liquid/gas hollow fiber membrane bioreactor: Efficient retention of hydrogen producing bacteria via granule and biofilm formation. **Bioresource Technology**, v. 319, e124203, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124203>
- REYNA-GÓMEZ, L. M.; CRUZ-LÓPEZ, A.; ALFARO, J. M.; SUÁREZ-VÁZQUEZ, S. I. Evaluation of the production of biohydrogen during the co-digestion of organic wastes in an upflow hybrid anaerobic reactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 425, e129235, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129235>
- RONDA, A.; HARO, P.; GÓMEZ-BAREA, A. Sustainability assessment of alternative waste-to-energy technologies for the management of sewage sludge. **Waste Management**, v. 159, p. 52-62, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.025>
- RUSMANIS, D.; YANG, Y.; LONG, A.; GRAY, N.; MARTINS, K. C.; LOIDEÁIN, S. Ó.; LIN, R.; KANG, X.; CUSAK, D. Ó.; CARTONS, J. G.; MONAGHAN, R.; MURPHY, J. D.; WALL, D. M. Electrofuels in a circular economy: A systems approach towards net zero. **Energy Conversion and Management**, v. 292, e117367, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117367>
- SAPPL, J.; HARDERS, M.; RAUCH, W. Machine learning for quantile regression of biogas production rates in anaerobic digesters. **Science of the Total Environment**, v. 872, e161923, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161923>
- SCRINZI, D.; FERRENTINO, R.; BAÙ, E.; FIORI, L.; ANDREOTTOLA, G. Sewage Sludge management at district level: reduction and nutrients recovery via hydrothermal carbonization. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, n. 8, p. 2505-2517, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01943-2>
- SENGUR, O.; AKGUL, D.; CALLI, B. In situ methane enrichment with vacuum application to produce biogas with higher methane content. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 28307-28318, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33881-y>
- SGANZERLA, W. G.; TENA, M.; SILLERO, L.; MAGRINI, F. E.; SOPHIATTI, I. V. M.; GAIO, J.; PAESI, S.; FORSTER-CARNEIRO, T.; SOLERA, R.; PEREZ, M. Application of anaerobic co-digestion of brewery by-products for biomethane and bioenergy production in a biorefinery concept. **BioEnergy Research**, v. 16, n. 4, p. 2560-2573, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10605-7>
- SIDDIQUI, M. I.; FAROOQI, I. H.; BASHEER, F.; RAMHEEZ, H.; ISA, M. H. Pretreatment of slaughterhouse effluent treatment plant sludge using electro-fenton process for anaerobic digestion. **Sustainability**, v. 15, n. 4, e3159, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15043159>
- SZAJA, A.; MONTUSIEWICZ, A.; LEBIOCKA, M. The energetic aspect of organic wastes addition on sewage sludge anaerobic digestion: a laboratory investigation. **Energies**, v. 14, n. 19, e6113, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14196113>
- TAPSOBA, J. G.; KOMAKECH, H. C.; OUMA, J. O. Potential of anaerobic co-digestion in improving the environmental quality of agro-textile wastewater sludge. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 3, p. 549-564, 2020. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.360>
- TAUBER, J.; RAMSBACHER, A.; SVARDAL, K.; KRAMPE, J. Energetic Potential for biological methanation in anaerobic sewage sludge digesters in Austria. **Energies**, v. 14, n. 20, e6618, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14206618>

- TENA, M.; PEREZ, M.; SOLERA, R. Benefits in the valorization of sewage sludge and wine vinasse via a two-stage acidogenic-thermophilic and methanogenic-mesophilic system based on the circular economy concept. **Fuel**, v. 296, e120654, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120654>
- THAKUR, H.; DHAR, A.; POWAR, S. Biogas production from anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in a continuously stirred tank reactor. **Results in Engineering**, v. 16, e100617, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100617>
- THAKUR, H.; VERMA, N. K.; DHAR, A.; POWAR, S. Anaerobic co-digestion of food waste and bio flocculated sewage sludge towards bio-methane production. **Energy Reports**, v. 11, p. 2867-2876, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.02.040>
- TRUONG, M. V.; NGUYEN, L. N.; LI, K.; FU, Q.; JOHIR, M. A. H.; FONTANA, A.; NGHIEM, L. D. Biomethane production from anaerobic co-digestion and steel-making slag: A new waste-to-resource pathway. **Science of the Total Environment**, v. 738, p. 139764, out. 2020.
- VÍTĚZ, T.; NOVÁK, D.; LOCHMAN, J.; VÍTĚZOVÁ, M. Methanogens Diversity during anaerobic sewage sludge stabilization and the effect of temperature. **Processes**, v. 8, n. 7, e822, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8070822>
- WANG, T.; ZHU, G.; LI, C.; ZHOU, M.; WANG, R.; LI, J. Anaerobic digestion of sludge filtrate using anaerobic baffled reactor assisted by symbionts of short chain fatty acid-oxidation syntrophs and exoelectrogens: Pilot-scale verification. **Water Research**, v. 170, e115329, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115329>
- WEHNER, M.; LICHTMANNEGGER, T.; ROBRA, S.; DO CARMO PRECCI LOPES, A.; EBNER, C.; BOCKREIS, A. Determination of the dewatered digestate amounts and methane yields from the co-digestion of biowaste as a basis for a cost-benefit analysis. **Waste Management**, v. 126, p. 632-642, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.030>
- ZAHEDI, S.; SOLERA, R.; PÉREZ, M. An eco-friendly way to valorize winery wastewater and sewage sludge: Anaerobic co-digestion. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, e105779, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105779>
- ZHU, A.; QIN, Y.; WU, J.; YE, M.; LI, Y.-Y. Characterization of biogas production and microbial community in thermophilic anaerobic co-digestion of sewage sludge and paper waste. **Bioresour Technol**, v. 337, e125371, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125371>
- ZUPANC, M.; HUMAR, B. B.; DULAR, M.; GOSTIŠA, J.; HOČEVAR, M.; REPINC, S. K.; KRZYK, M.; NOVAK, L.; ORTAR, J.; PANDUR, Ž.; STRES, B.; PETKOVŠEK, M. The use of hydrodynamic cavitation for a waste-to-energy approach to enhance methane production from waste activated sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 347, e119074, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119074>

**Contribuciones de los autores:** Y.A.T.-O.: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción del borrador original, revisión y edición; J.L.L.-P.: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción del borrador original, revisión y edición; D.A.C.-L.: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción del borrador original, revisión y edición; D.J.S.C.M.: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción del borrador original, revisión y edición. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

**Disponibilidad de datos:** Los datos de esta investigación pueden obtenerse por correo electrónico, previa solicitud al autor correspondiente o al segundo autor.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflictos de intereses.



**Copyright:** © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).