



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:
“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
IBARRA”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Biotecnología.

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR(A):
Túquerrez Sandoval Mercedes Carolina

DIRECTOR(A):
MSc. Santiago Mauricio Salazar Torres

Ibarra, 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100370037-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Túquerrez Sandoval Mercedes Carolina		
DIRECCIÓN:	Av. El Retorno 27-24 y Nazacota Puento		
EMAIL:	mctuquerrezs@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062 510 695	TELÉFONO MÓVIL:	0995059084

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES IBARRA
AUTOR (ES):	Túquerrez Sandoval Mercedes Carolina
FECHA: DD/MM/AAAA	12-marzo-2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Biotecnología
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Santiago Mauricio Salazar Torres

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 12 días del mes de marzo de 2026

EL AUTOR:

Túquerrez Sandoval Mercedes Carolina

**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado **“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES IBARRA”**, ha sido desarrollado por la señorita **Mercedes Carolina Tuquerrez Sandoval**, como requisito previo a la obtención del título de **Ingeniera en Biotecnología**, ha sido realizado bajo mi dirección, cumpliendo con los lineamientos académicos y metodológicos establecidos por la Universidad Técnica del Norte.

Por lo expuesto, considero que el presente trabajo reúne los méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal correspondiente.

En constancia de lo expuesto, firmo la presente certificación.

Ibarra, 12 de marzo de 2026

MSc. Santiago Salazar

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por haberme concedido la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional. Su guía y bendición constante fueron mi sostén en los momentos de dificultad y mi luz en cada paso dado hacia este sueño.

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por brindarme la oportunidad de formarme como profesional en Ingeniería en Biotecnología. Cada enseñanza y experiencia fortalecieron no solo mis conocimientos, sino también mi compromiso con la aplicación responsable de la ciencia, orientada a la productividad sostenible y al cuidado del ambiente.

Agradezco de manera especial a mi tutor, MSc. Santiago Salazar, y a la MSc. Carlita Sandoval, por su orientación, paciencia y apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, a los docentes MSc. Santiago Zárate, MSc. Pedro Barba y MSc. Andrea Chiliquina, quienes con sus conocimientos y acompañamiento contribuyeron significativamente a mi formación académica.

A mis amados padres, Yolanda y Rafael, gracias por ser el pilar fundamental de mi vida. Ustedes sembraron en mí la disciplina, la responsabilidad y la perseverancia que me permitieron llegar hasta aquí. En cada jornada larga de estudio y en cada momento de cansancio, su amor y confianza fueron mi mayor impulso. Este logro también les pertenece, porque sobre su esfuerzo y sacrificio construí este sueño.

A mi querida abuelita Mariana, que me acompaña desde el cielo, gracias por su ternura, sus consejos y su ejemplo de fortaleza. Su recuerdo vive en mi corazón y sé que este triunfo también es parte de su legado en mi vida.

A Darío, gracias por su comprensión, apoyo y acompañamiento durante este proceso. Su presencia fue importante para mantenerme firme y continuar avanzando con determinación.

A mis hijos, Martín y Emir, mi mayor bendición y motivación. Cada sacrificio y cada meta alcanzada tuvieron siempre un propósito: ustedes. Fueron mi fuerza cuando el cansancio quería vencerme y la razón por la cual nunca me rendí. Que este logro sea un ejemplo de que con fe, amor y perseverancia los sueños sí se cumplen.

Finalmente, agradezco a mis hermanos, familiares, amigos y a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este camino y contribuyeron a la culminación de esta etapa tan significativa de mi vida.

DEDICATORIA

Dedico este logro, que representa años de esfuerzo, desvelos y perseverancia, a los amores más grandes de mi vida.

A mi hijo Martín, quien creció viéndome estudiar, esforzarme y luchar por este sueño. Hijo mío, fuiste testigo de cada madrugada, de cada cansancio y de cada meta que parecía lejana. Sin saberlo, me enseñaste a ser fuerte, constante y valiente. Esta meta también lleva tu nombre, porque crecimos juntos en este proceso.

A mi pequeño Emir, que llegó hace dos años como un regalo de Dios y se convirtió en la luz que iluminó la etapa final de este camino. Tu llegada me dio una razón aún más grande para terminar lo que había comenzado. Eres parte de esta culminación, de esta victoria y de esta promesa cumplida.

A mis padres, Rafael y Yolanda, mis raíces firmes y el ejemplo vivo de amor y sacrificio. Ustedes creyeron en mí cuando todo parecía difícil, me sostuvieron cuando dudé y me enseñaron que la educación es la herencia más poderosa para transformar la vida. Este título no es solo mío, es el reflejo de su fe en mí.

A mis hermanos, Julián y Francisco, por su apoyo constante y por recordarme que nunca debía rendirme.

Y a ti, mi querida abuela Marianita, a quien el día de tu partida te prometí graduarme. Esa promesa fue mi fuerza en los momentos más difíciles. Hoy puedo decirte que lo logré. Este título lleva tu memoria, tu fortaleza y tu amor eterno.

Este logro no solo representa una carrera culminada en Ingeniería en Biotecnología, sino también el resultado que nace de una mujer abrazada por su fe y sostenida por su familia, que convirtió el cansancio en impulso y las lágrimas en victoria; y si alguna vez se duda que los sueños florecen, que esta tesis susurre que el amor, la perseverancia y una promesa hecha desde el alma tienen la fuerza de mover montañas.

Con todo mi corazón, Carolina

RESUMEN

Por la necesidad de fuentes alternativas de energía y por las soluciones para la basura urbana. El problema se genera por el aumento de lodos provenientes del tratamiento de aguas, los cuales generan problemas ambientales, operativos y económicos, por la disposición final y por la potencial emisión de contaminantes. En ese sentido, se buscó describir tecnologías de digestión anaerobia para la PTAR-I y sugerir mejoras para hacer un mejor uso energético del biogás producido y medir su impacto ambiental. Metodológicamente, el estudio se abordó bajo un diseño descriptivo y documental de revisión sistemática de literatura científica indexada y análisis contextual de la planta, con criterios de selección bajo la metodología PRISMA para asegurar rigor científico y comparabilidad técnica entre tecnologías. Los resultados mostraron diferencias significativas en la producción mensual de biogás y lodos, siendo los digestores UASB y flujo pistón las mejores alternativas por su eficiencia para estabilizar materia orgánica, menor espacio requerido y capacidad para mantener la producción constante a pesar de la variabilidad operativa. También se concluyó que la aplicación de sistemas avanzados de digestión anaerobia reduce gases de efecto invernadero y fortalece la economía circular al generar energía a partir de residuos. En conclusión, la investigación evidencia que el uso del biogás es una alternativa técnica y ambientalmente viable para optimizar el manejo de lodos en la PTAR-I, generar energías renovables y contribuir al desarrollo sostenible del sector hídrico local.

Palabras clave: biogás; digestión anaerobia; lodos residuales; tratamiento de aguas residuales; energía renovable.

ABSTRACT

Due to the need for alternative energy sources and solutions for urban waste, the problem arises from the increase in sludge from wastewater treatment, which generates environmental, operational, and economic problems due to its final disposal and the potential emission of pollutants. In this context, the aim was to describe anaerobic digestion technologies for the WWTP-I (Wastewater Treatment Plant I) and suggest improvements to make better use of the energy produced biogas and measure its environmental impact. Methodologically, the study employed a descriptive and documentary design, including a systematic review of indexed scientific literature and a contextual analysis of the plant, with selection criteria based on the PRISMA methodology to ensure scientific rigor and technical comparability between technologies. The results showed significant differences in the monthly production of biogas and sludge, with UASB and plug flow digesters being the best alternatives due to their efficiency in stabilizing organic matter, smaller space requirements, and capacity to maintain constant production despite operational variability. It was also concluded that the application of advanced anaerobic digestion systems reduces greenhouse gases and strengthens the circular economy by generating energy from waste. In conclusion, this research demonstrates that the use of biogas is a technically and environmentally viable alternative for optimizing sludge management at the WWTP-I, generating renewable energy, and contributing to the sustainable development of the local water sector.

Keywords: biogas; anaerobic digestion; sewage sludge; wastewater treatment; renewable energy.

ABREVIATURAS

- CH₄: Metano.
- CO₂: Dióxido de carbono.
- CSTR: Reactor continuo agitado.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- Elsevier: Base de datos científica y editorial académica.
- EMAPA: Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero.
- H₂S: Sulfuro de hidrógeno.
- NCBI: National Center for Biotechnology Information.
- PRISMA: Elementos de Informes Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis.
- PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
- PTAR-I: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra.
- Scopus: Base de datos bibliográfica científica indexada.
- UASB: Reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente.
- WoS: Web of Science (Base de datos científica).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problema de Investigación	3
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Pregunta directriz	7
CAPÍTULO II	7
2. Marco Teórico.....	7
2.1 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)	7
2.1.1 Aguas Residuales.....	7
2.1.2 Lodos Residuales.....	9
2.1.3 Tratamiento de Lodos Residuales.....	11
2.1.4 Uso de Lodos Residuales.....	13
2.2 Digestión anaerobia.....	15
2.2.1 Microbiología anaerobia.....	15
2.2.2 Fases del proceso de digestión anaerobia.....	16
2.3 Tecnología y Equipos para la Producción de Biogás	17
2.3.1 Tipos de Biodigestores	18

	10
2.4 Fundamentos del biogás	26
2.4.1 Conceptos básicos sobre biogás	26
2.4.2 Principio de la producción del biogás	26
2.4.3 Factores que afectan la producción del biogás	27
2.4.4 Usos y aplicaciones del biogás	28
CAPÍTULO II	30
3. Metodología	30
3.1 Descripción del área de estudio.....	30
3.2 Diseño y tipo de estudio	30
3.3 Descripción del método de investigación.....	31
3.3.1 Describir las tecnologías de digestión anaerobia disponibles para el tratamiento de lodos residuales y la producción de biogás	31
3.3.2 Investigar el impacto ambiental de la producción de biogás a partir de lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas.	31
3.3.3 Elaborar una propuesta del aprovechamiento potencial del biogás producido a partir de los lodos residuales de la PTAR-I.....	34
CAPÍTULO IV	35
4. Resultados y Discusión	35
4.1 resultados.....	35
4.1.1 Evaluación de las tecnologías más óptimas de digestión de lodos residuales para la obtención de biogás en la PTAR-I.....	35
4.1.2 Impacto ambiental del proceso del aprovechamiento de biogás a partir de lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas	39

4.1.3 Propuesta de mejora	46
4.2 Discusión.....	57
CAPÍTULO V	666
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	667
Bibliografía	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de generación de lodos residuales.....	11
Figura 2. Modelo de biodigestor discontinuo	19
Figura 3. Modelo de biodigestor continuo	20
Figura 4. Modelo de biodigestor semicontinuo.....	21
Figura 5. Modelo de biodigestor de flujo pistón.....	22
Figura 6. Modelo de biodigestor de cúpula fija	23
Figura 7. Modelo de biodigestor UASB	24
Figura 8. modelo de biodigestor de flujo ascendente.....	25
Figura 9. modelo de biodigestor tubular	26

CAPÍTULO I

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Actualmente el planeta se ve en la necesidad de aplicar prácticas medioambientales sostenibles y energías renovables para ser aprovechadas por los seres humanos, la producción de biogás a partir de lodos residuales emerge como una solución prometedora. Los lodos residuales son un subproducto inevitable del tratamiento de aguas residuales, los cuales son ricos en materia orgánica, pero a su vez representan un desafío significativo tanto en términos de manejo como de desecho. La acumulación de lodos que se producen a partir del tratamiento de aguas residuales, principalmente por el crecimiento poblacional en las zonas urbanas, genera riesgos relacionados a la salud, al medio ambiente y al clima, ya que aproximadamente el 80 % de las aguas residuales se vierten sin tratar en las rutas fluviales (Selamawit y Agizew, 2022).

Mediante procesos biotecnológicos es posible el aprovechamiento de la capacidad de generar biogás por parte de los lodos residuales y a la vez realizar un saneamiento de las aguas negras. La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás, el cual está compuesto por una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono. Este proceso no solo ayuda a reducir el volumen y la peligrosidad de los lodos residuales, sino que también contribuye a la generación de una fuente de energía renovable que puede utilizarse para diversas aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta el combustible para vehículos (Gherghel et al., 2019).

El uso de lodos residuales para la producción de biogás presenta múltiples beneficios ambientales, ya que reduce la necesidad de vertederos o incineración, métodos tradicionales de disposición de lodos que pueden causar contaminación del suelo, aire y agua. Además, la

producción de biogás contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como es el caso del metano, que cuando es capturado y utilizado como biogás, no se libera directamente a la atmósfera, donde es un gas de efecto invernadero mucho más potente que el dióxido de carbono (Martinez, 2023).

Desde una perspectiva energética, el biogás representa una fuente de energía renovable que puede complementar otras fuentes de energía verde como la solar y la eólica, que, a diferencia de estas fuentes, el biogás puede producirse de manera continua y estable, lo que ayuda a equilibrar las fluctuaciones en la generación de energía renovable. A pesar de sus beneficios, la producción de biogás a partir de lodos residuales enfrenta varios desafíos ya que influyen algunos factores como la variabilidad en la composición de los lodos puede afectar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia y por ende la cantidad y la calidad del biogás producido (Espinosa, 2021).

La digestión anaerobia se ha aplicado durante más de cuatro décadas especialmente en el tratamiento de aguas residuales industriales, puesto que es un proceso amigable con el medio ambiente, que se está aplicando a escala industrial para la eliminación y valorización efectiva de lodos. La investigación e innovación de biotecnologías para optimizar el proceso de digestión anaerobia buscan hacer más rentable y eficiente la producción de biogás que podrían impulsar significativamente el uso de lodos residuales como una fuente viable de energía (Elalami et al., 2019).

Hoy en día, el sector del biogás se ha convertido en una base de la economía circular donde se logra reciclar nutrientes, reducir emisiones de gases efecto invernadero y producir energía. Por lo que la industria del biogás ha aumentado aproximadamente un 90%, incrementando la conversión de energía de 65GW a 120 GW que se generaron en 2019. Siendo Europa quien genera más del 70% de biogás a nivel mundial, lo que representa 64 TWh. Mientras que en China e India

la tasa de consumo de biogás es total, únicamente utilizan biogás debido a la aplicación de políticas y normativas (ÓhAiseadha et al., 2020).

En términos de producción de energía térmica, el biogás se está convirtiendo en la fuente de calor más importante, el 4% del biocalor mundial en 2015 fue generado por biogás. En la Unión Europea, el biogás corresponde aproximadamente el 50% de uso total de biogás. En Dinamarca, el coste de energía producida por biogás es de 0.056 EUR/kWh (Selamawit y Agizew, 2022). Por otra parte, en México abundan las Plantas de tratamiento de aguas (PTAR) ya que en promedio una PTAR produce alrededor de 2,671.49 m³/ día con un potencial energético de 17,312.59 kW y que a su vez contribuye a la reducción del 78% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Ramírez et al., 2020).

En una PTAR de Honduras, se menciona que se estima una carga orgánica promedio de 6,198.46 kg/día y esta alcanza una producción de biogás de 1,806.74 m³/día, el cual tiene una potencia térmica de 0.46 MWt y una potencia eléctrica de 161 kW (Sánchez O. , 2016). Un estudio realizado en una PTAR de Colombia señala que, como objetivo principal se debe tratar el agua negra y disminuir la carga de contaminación, pero a su vez se obtiene otros subproductos como solidos gruesos, solidos finos, grasas, arenas, biosólidos y gases, los cuales pueden ser aprovechados para la producción de energía renovable, de esta manera se producen 33.000 m³/día de biogás, el cual se almacena en gasómetros y se utiliza de acuerdo con las necesidades de calentamiento y mezcla en los digestores (Rodríguez L. , 2022).

1.2 Problema de Investigación

El tratamiento de aguas residuales es una actividad crucial para la gestión ambiental y la salud pública, ya que permite la eliminación de contaminantes y la reutilización segura del agua. Sin embargo, un subproducto inevitable de este proceso es la generación de lodos residuales, los

cuales presentan desafíos significativos en términos de manejo y disposición final. En algunas partes, las gestiones de lodos residuales implican prácticas como la incineración, el vertido en rellenos sanitarios y la aplicación en terrenos agrícolas, cada una con sus propias limitaciones ambientales y económicas.

El agua es un recurso finito y vital para todas las formas de vida, sin embargo, la contaminación de los cuerpos de agua debido a desechos industriales, agrícolas y domésticos es un problema creciente en todo el mundo. Las PTAR, al tratar adecuadamente las aguas residuales ayudan a prevenir la eutrofización, un proceso que causa un crecimiento excesivo de algas debido a altos niveles de nutrientes, lo cual puede resultar en la muerte de la vida acuática y la degradación de los ecosistemas acuáticos. Además, al eliminar patógenos y contaminantes tóxicos, se protege la salud humana, reduciendo la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua (Grajeda y Pocasangre, 2019).

En Latinoamérica existe gran preocupación por el impacto generado a partir del incremento de los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales ya que estos tienen residuos peligrosos como metales y gases de efecto invernadero además de organismos patógenos. La tasa de generación de residuos sólidos se ha incrementado debido al crecimiento demográfico y económico, lo que ha causado una nueva amenaza para la sostenibilidad. La tasa promedio de generación en Latinoamérica es de 1,04 kg/hab por día, además alrededor de 40 millones de personas carecen de acceso a la recolección de residuos y más del 50% de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados son orgánicos (Parra Orobio et. Ál. 2014).

En Ecuador según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), según las estadísticas ambientales, un habitante de la zona urbana produce en promedio 0.58kg de residuos sólidos al día (Guerra Herrera et al., 2019). Se desconoce la cantidad de emisiones de gases que

producen estos residuos sólidos, apenas existe información en la literatura que identifique y cuantifique las emisiones de GEI de los sitios de disposición final, como lo es una planta de tratamiento de aguas residuales de una ciudad.

En la ciudad de Ibarra se encuentra la planta para tratar las aguas residuales (PTAR-I) que se generan luego de actividades domésticas e industriales, que desembocan en un 95% en el río Tahuando, contaminando este río con materia fecal, urinal, grasas, arenas, metales, entre otros. En la actualidad, un 90% del agua de este río es receptada en la PTAR-I, lo que equivale a un procesamiento de 415 litros/día de agua y que además genera de 60 a 80 m³ de lodo cada mes (EMAPA, 2018).

A pesar de los beneficios potenciales de la implementación de tecnologías para producción de biogás a partir de lodos residuales existen ciertos desafíos técnicos, económicos y operativos que no se han analizado; estos incluyen la variabilidad en la composición de los lodos, la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, los costos de infraestructura y operación.

1.3 Justificación

Este estudio es de gran relevancia porque aborda la importancia de la gestión de residuos y la producción de energía renovable, ambos aspectos críticos en la agenda de sostenibilidad global. La reducción de los gases de efecto invernadero es de importancia a nivel global, donde en distintos acuerdos internacionales se ha planteado el principal objetivo que es incorporar medidas de control para aumentar el consumo de energía no contaminante en la matriz energética de los países. La energía renovable es una alternativa imprescindible a los combustibles fósiles debido al menor impacto ambiental (Mohamed et al., 2018).

La tecnología para la generación de biogás es un tema relevante para el desarrollo de fuentes alternativas de energía y la solución al mismo tiempo de la cuestión de los considerables

desechos municipales, incluidos los lodos formados después del procesamiento de las aguas residuales (Muñoz et al., 2020). La producción de biogás no solo es una forma rentable de producción de energía, es también un enfoque sostenible para la resolución de un problema de salud y ambiental causado por una acumulación de desperdicios no tratados que se pueden reciclar como energía renovable sostenible (Mohamed et al., 2018).

Esta investigación propone el estudio de tecnologías de digestión anaerobia y la evaluación de su utilidad y eficacia en la PTAR-I de Ibarra y puede resultar en una contribución significativa en la resolución de cuestiones ambientales y el acercamiento a una gestión de desperdicios más sostenible. Del mismo modo, aunque la producción de biogás a partir de lodos residuales pretende a no solo resolver el problema de los desechos, sino que también la proveer de una alternativa sostenible y, finalmente, a largo plazo, a la diversificación de las energías limpias. Asimismo, mediante el análisis de la literatura consolidada, también, este estudio proporcionará una sólida base de investigación para futuros trabajos e investigación y para implementación, lo que beneficiará a académicos y profesionales de la disciplina.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Describir las tecnologías de digestión de lodos residuales para la generación de biogás a en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra para la elaboración de una propuesta de mejoramiento de la producción de biogás.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir las tecnologías de digestión anaerobia disponibles para la producción de biogás a partir de lodos residuales y evaluar cuál es la tecnología que mejor se ajusta a la realidad de la PTAR-I.

- Investigar el impacto ambiental de la producción de biogás a partir de lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas.
- Elaborar una propuesta para mejorar el aprovechamiento del biogás producido a partir de los lodos residuales de la PTAR-I

1.5 Pregunta directriz

¿Es posible el mejoramiento de la producción de biogás a partir de lodos residuales de la PTAR-I, para generar otros subproductos?

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Las PTAR son instalaciones que se encargan de purificar el agua contaminada por actividades humanas, industriales, agrícolas y domésticas, eliminando contaminantes y patógenos para que pueda ser devuelta de manera segura al medio ambiente; con la finalidad de proteger la salud pública y el medio ambiente, permitiendo la reutilización del agua y la recuperación de recursos valiosos como el biogás y los biosólidos. Las PTAR funcionan a través de una serie de etapas: el tratamiento primario, que elimina sólidos grandes mediante tamizado y sedimentación; el tratamiento secundario, que utiliza procesos biológicos para descomponer la materia orgánica disuelta; y el tratamiento terciario, que elimina nutrientes y desinfecta el agua. Los lodos resultantes son gestionados mediante digestión anaerobia y deshidratación para reducir su volumen y permitir su aprovechamiento (Tenemaza et al., 2024).

2.1.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales son aguas que han sido afectadas por diversas actividades antropogénicas, modificando sus características físicas, químicas y microbiológicas en un aspecto

negativo, ya que estas aguas contienen una mezcla de contaminantes como: materia orgánica de desecho, productos químicos o industriales, nutrientes, microorganismos patógenos y residuos sólidos; es decir que, se convierte en agua que, debido a su calidad, cantidad o al momento en que está disponible, ya no tiene un uso inmediato para el propósito original para el que fue utilizada o producida (Zarza, 2024).

Cuando las aguas residuales son tratadas adecuadamente, ofrecen varios beneficios significativos, puesto que dependiendo de las características del agua pueden reutilizarse para riego agrícola, lo que conserva recursos hídricos y reduce la demanda de agua potable. Además, el tratamiento de estas aguas permite la recuperación de subproductos valiosos como el biogás y los biosólidos, que pueden servir para la transformación en energía o biofertilizantes; esto contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la contaminación de cuerpos de agua y disminuir la dependencia de combustibles fósiles y fertilizantes químicos (Paucar y Iturregui, 2020).

Las actividades humanas generan distintos tipos de desechos, es así que dependiendo de su procedencia las aguas residuales se clasifican en:

- **Domesticas o urbanas:** son aquellas que se generan en el entorno residencial a partir de actividades diarias como el uso de baños, duchas, cocinas y lavanderías. Estas aguas contienen una mezcla de contaminantes, incluyendo restos de alimentos, desechos fecales, detergentes, productos de limpieza, grasas y aceites, así como pequeñas cantidades de productos químicos utilizados en los hogares (Osorio et al., 2021).
- **Industriales:** son aquellas aguas que se generan como resultado de procesos de manufactura y producción en fábricas y plantas industriales, que contienen una amplia variedad de contaminantes específicos del tipo de industria, como productos químicos, metales pesados, aceites, grasas, tintes y solventes. La procedencia de estas aguas es diversa e

incluye industrias químicas, metalúrgicas, textiles, farmacéuticas, alimentarias y petroquímicas, entre otras. Debido a la naturaleza y cantidad de contaminantes, estas aguas requieren un tratamiento especializado antes de ser liberadas al medio ambiente o reutilizadas (Carrera y Suárez, 2019).

- **Agropecuaria:** son aquellas que se generan a partir de actividades agrícolas y ganaderas, estas aguas contienen nutrientes como nitrógeno y fósforo, pesticidas, herbicidas, residuos de fertilizantes y materia orgánica proveniente de excrementos animales y desechos de cosechas. La procedencia de estas aguas incluye explotaciones agrícolas donde se cultivan plantas y se aplican productos químicos para mejorar la producción, así como granjas y establos donde se cría ganado y se manejan grandes cantidades de residuos animales (Arias, 2020).
- **Pluviales:** son aquellas que se generan a partir de la escorrentía del agua de lluvia sobre superficies urbanas e industriales, durante su recorrido, estas aguas arrastran diversos contaminantes como aceites, metales pesados, productos químicos, sedimentos y residuos sólidos acumulados en calles, techos, estacionamientos y otras superficies impermeables. La procedencia de estas aguas es principalmente el agua de lluvia que puede o no infiltrarse en el suelo y que fluye hacia los sistemas de drenaje pluvial, llevando consigo los contaminantes que encuentra a su paso (Accostupa et al., 2019).

2.1.2 Lodos Residuales

Un lodo residual es un subproducto semisólido que consiste en una mezcla de agua y sólidos, incluyendo materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y posibles contaminantes químicos provenientes de aguas residuales de fuentes naturales o industriales que se han procesado en una PTAR. Los lodos residuales deben ser adecuadamente gestionados y

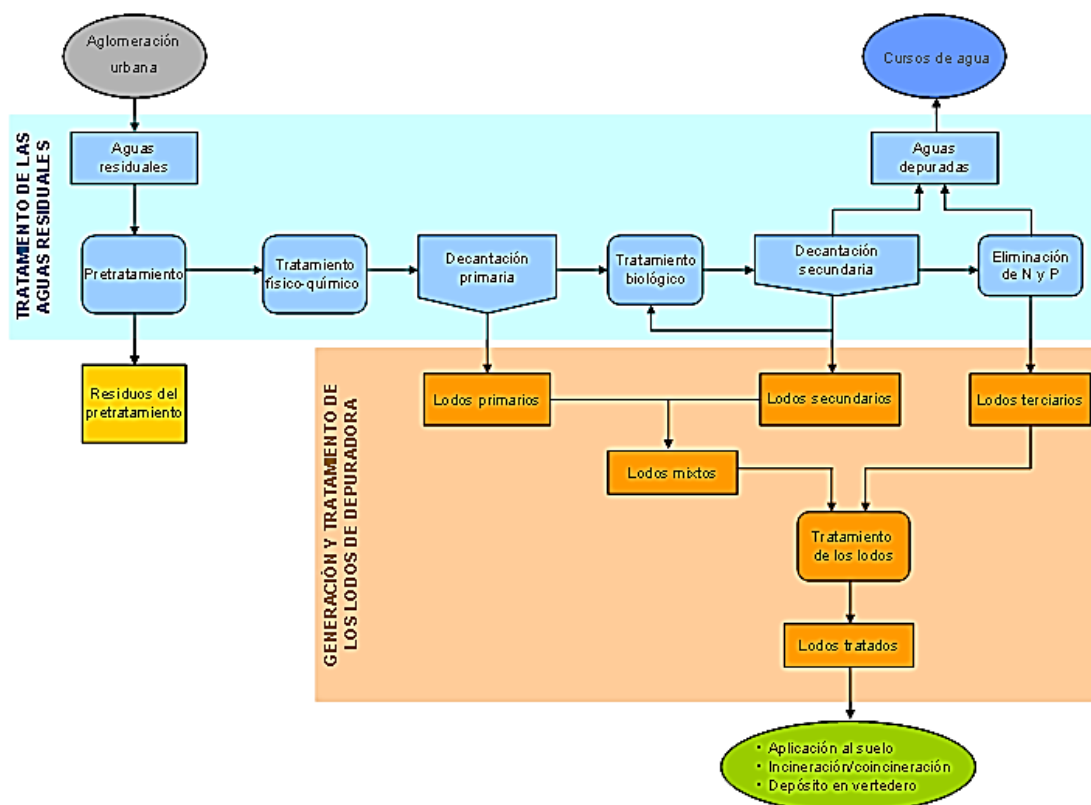
tratados para reducir su volumen, estabilizar la materia orgánica para minimizar los riesgos ambientales y sanitarios antes de su disposición final o reutilización en aplicaciones como la agricultura, la generación de energía o la recuperación de recursos (Palacios, 2021).

El proceso de formación de un lodo residual comienza cuando las aguas residuales, provenientes de la lluvia, hogares, industrias o fuentes agrícolas, ingresan a una PTAR donde los sólidos grandes y las arenas son eliminadas mediante cribado y sedimentación en las primeras fases del tratamiento de agua; luego pasan por procesos de digestión biológica en los que microorganismos descomponen la materia orgánica en tanques de aireación. Durante estos procesos, los sólidos suspendidos y la biomasa microbiana se agrupan formando un lodo, el cual se separa del agua tratada en clarificadores secundarios y puede someterse a tratamientos adicionales como digestión anaerobia o aerobia para reducir su volumen y estabilizarlo, transformándose en un subproducto más seguro y manejable para su disposición final o posible reutilización como se indica en la Figura 1 (Guananga et al., 2024).

Los lodos residuales poseen una serie de características que varían según su origen y el proceso de tratamiento al que han sido sometidos, pero generalmente, son de consistencia semisólida y contienen un alto porcentaje de agua, entre 60% y 95%. Algunas de las sustancias contenidas en estos lodos poseen valor agronómico como nutrientes orgánicos como N, P, K, Ca, Mg y otros micronutrientes esenciales para las plantas; así mismo, se encuentran sustancias con potencial contaminante como los metales pesados, entre ellos están: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn y los organismos patógenos (Chipana, 2022). Además, los lodos residuales pueden tener un olor fuerte y desagradable debido a la presencia de compuestos volátiles; y debido a su contenido energético y nutritivo son potencialmente valiosos para la recuperación de recursos, aunque

también presentan desafíos en términos de manejo, tratamiento y disposición final debido a sus propiedades físicas y químicas (Giraldo y Lozada, 2019).

Figura 1. Proceso de generación de lodos residuales



Fuente: Generación y tratamiento de los lodos, 2021

2.1.3 Tratamiento de Lodos Residuales

El tratamiento de lodos residuales es un proceso complejo y multifacético que requiere una combinación de métodos físicos, químicos y biológicos para transformar un subproducto potencialmente dañino en un material manejable y en algunos casos, en materia útil; esto es esencial para proteger el medio ambiente y la salud pública, al mismo tiempo que se optimizan los recursos y se reducen los costos operativos (Méndez, 2024). Para el correcto tratamiento de los lodos se deben efectuar los siguientes procesos:

1. **Especiación:** es el primer paso en el tratamiento de lodos residuales y tiene como objetivo reducir el volumen del lodo aumentando su concentración de sólidos; y a su vez disminuye los costos y la complejidad de los tratamientos posteriores al reducir la cantidad de lodo a manejar. Esto se logra mediante procesos físicos como la sedimentación o el uso de espesadores gravitacionales, en los cuales, los sólidos suspendidos se separan del agua mediante la fuerza de la gravedad, formando un lodo más concentrado y reduciendo el volumen de agua a tratar en las etapas posteriores (García y Mora, 2020).
2. **Estabilización:** intenta reducir la actividad biológica del lodo, disminuir su olor y matar patógenos, existen dos formas que son: salida aerobia y salida anaerobia. La digestión aeróbica involucra el uso de oxígeno para apoyar la actividad microbiana que descompone la materia orgánica en el lodo, lo que resulta en un producto más estable. Por otro lado, la digestión anaerobia se produce en ausencia de oxígeno y produce biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono, que puede usarse para obtener energía, convirtiendo el lodo en un material más seguro y fácil de manejar y desechar (Sierra et al., 2020).
3. **Deshidratación:** después de la estabilización, el lodo todavía contiene una gran cantidad de agua que debe extraerse, se realiza con filtros prensa, centrifugas o lechos de secado, mediante fuerzas mecánicas o naturales para eliminar el agua restante del lodo, y dar lugar a un producto más sólido. La deshidratación eficiente es vital para reducir el transporte de costos y desechar lodos adicionales (Cárdenas, 2022).
4. **Desecho final y reutilización:** es la última etapa en la cual se debe desechar el lodo deshidratado con éxito o volver a utilizarlos. La eliminación del lodo secado incluye la eliminación de vertederos mono o incineración Controlado donde el lodo se quema para su eliminación y reducción de desechos, lo que puede ayudar a hacer más energía. Una de

las mejores prácticas es reutilizar el lodo seco en la granja debido al alto nivel de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. Antes de aplicarlo, el lodo debe cumplir con las regulaciones de cantidad perjudicial (Devia y Yate, 2022).

2.1.4 Uso de Lodos Residuales

Los lodos residuales ofrecen múltiples oportunidades de uso en la agricultura y la industria, además de un gran potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Estos usos no solo fomentan la sostenibilidad energética y la economía circular, sino también juegan un papel importante en la mitigación de problemas medioambientales relacionados con la gestión de residuos contaminantes y la dependencia de los combustibles fósiles (Cárdenas, 2022).

Cuando estos lodos se tratan adecuadamente, se convierten en una rica fuente de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio, que son fundamentales para el crecimiento saludable de las plantas. Esta materia de lodos puede transformarse en fertilizantes orgánicos que liberan los nutrientes de manera sostenida y, por lo tanto, mejoran la fertilidad del suelo durante períodos más largos que los fertilizantes sintéticos (Zabotto et al., 2029).

Asimismo, el uso de lodo como fertilizante también ayuda a disminuir la dependencia de insumos químicos, lo que reduce los costos de los insumos para los agricultores y fomenta en última instancia la agricultura sostenible y amigable con el medio ambiente. Al reciclar los nutrientes contenidos en el lodo, el ciclo de nutrientes también se cierra; de esta manera, al mismo tiempo, los problemas relacionados con la gestión de residuos y el uso excesivo de fertilizantes químicos se pueden reducir (Medina et al., 2020).

Por ende, los lodos pueden ser empleados como mejoradores del suelo, aportando nutrientes y composición física, ya que la materia orgánica contenida en los lodos aumenta la capacidad de retención de agua del suelo, lo que es especialmente beneficioso en áreas propensas

a la sequía. Esta mejora en la estructura del suelo facilita la aireación y el desarrollo de las raíces, promoviendo un crecimiento más robusto de las plantas. Así mismo, los lodos incrementan la capacidad del suelo para retener nutrientes, reduciendo el riesgo de lixiviación y asegurando que los nutrientes estén disponibles para las plantas durante períodos más largos, optimizando de esta forma el rendimiento agrícola y contribuyendo a la mejora de la salud general del ecosistema del suelo (Ayala et al., 2022).

En áreas afectadas por erosión severa o contaminación química, la aplicación de lodos representa una solución útil para la rehabilitación del suelo. Los lodos, ricos en materia orgánica y nutrientes esenciales, pueden mejorar estructuralmente la tierra y aumentar su fertilidad, lo que facilita el crecimiento de la vegetación. Por lo tanto, la aplicación de lodos también tiene efectos beneficiosos sobre la estabilización del suelo en su conjunto, reduciendo la vulnerabilidad a la erosión futura. Desde el punto de vista medioambiental, la aplicación de lodos disminuye el impacto negativo general al mitigar la erosión del terreno y también puede contribuir a la restauración de los ecosistemas dañados, aumentando la biodiversidad y la resiliencia a largo plazo. De igual manera, los lodos pueden utilizarse industrialmente en aplicaciones constructivas, como la producción de ladrillos, cemento u otros compuestos que contengan cal. Alania e Inga (2022) destacan que los lodos pueden incluirse en mezclas para ladrillos y cemento debido a sus características físicas y químicas, que mejora sus propiedades plásticas y la resistencia.

Por consiguiente, el uso de lodos en la construcción no solo puede ser ambiental y socialmente sostenible, sino que también crea oportunidades de negocio sostenible mientras reduce los costes de fabricación de ladrillos o cemento (Fuentes et al., 2019). Asimismo, los lodos pueden ser empleados como combustible alternativo en el co-procesamiento en plantas de cemento. Al utilizar los lodos en la combustión de los hornos de cemento, se reduce la dependencia de

combustibles fósiles, disminuyendo así las emisiones de carbono y promoviendo prácticas industriales más ecológicas y sostenibles (Carcasi y Vilchez, 2022). Como bien es conocido que los lodos residuales son ricos en materia orgánica, representan una fuente valiosa para la generación de biogás a través de la digestión anaerobia, produciendo biogás, compuesto principalmente de metano que posteriormente puede ser capturado y utilizado como un combustible limpio y eficiente, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles tradicionales (Garcia, 2021).

2.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica de procedencia animal o vegetal, en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y un residuo orgánico llamado digestato, teniendo como productos biogás y abonos. En el siglo XVII, Robert Boyle y Stephen Hale observaron la producción de gas inflamable al perturbar sedimentos acuáticos, despertando interés científico. Posteriormente, el científico Sir Humphry Davy identificó metano en gases de estiércol en 1808; éste fue el principio para la construcción del primer digester anaeróbico fue creado por leprosos en Bombay en 1859 (Univision, 2028).

2.2.1 Microbiología anaerobia

La microbiología anaerobia desempeña un papel fundamental en la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica de la materia orgánica, mediante la descomposición de compuestos orgánicos por microorganismos en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la liberación de biogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono (Garcia, 2021).

Dentro de este ecosistema microbiano existen diferentes tipos de bacterias que trabajan de manera sinérgica para descomponer los sustratos orgánicos; en la etapa inicial, las bacterias

acidogénicas convierten los sustratos orgánicos en ácidos grasos volátiles, alcoholes y otros compuestos simples. Posteriormente, las bacterias acetogénicas convierten estos productos intermedios en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, las bacterias metanogénicas, pertenecientes principalmente al dominio Archaea, transforman el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano, el componente principal del biogás (FAO, 2019).

Las bacterias metanogénicas se clasifican en diferentes grupos, como *Methanobacteria*, *Methanococci*, y *Methanomicrobia*, cada uno con su propio sustrato preferido y condiciones de crecimiento. Por ejemplo, *Methanobacteria* y *Methanococci* son típicamente acetotróficas y utilizan acetato como sustrato, mientras que *Methanomicrobia* son hidrogenotróficas y producen metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente especializadas y sensibles a factores ambientales como el pH, la temperatura y la concentración de nutrientes, lo que puede influir significativamente en la eficiencia y la estabilidad del proceso de producción de biogás (Nicho et al., 2021).

2.2.2 Fases del proceso de digestión anaerobia

Es fundamental comprender las fases de la digestión anaerobia porque este proceso es la base de la producción de biogás; al entender cómo las diferentes etapas de la digestión anaerobia trabajan en conjunto, los investigadores, ingenieros y operadores pueden optimizar el rendimiento de los biodigestores y maximizar la producción de biogás.

1. **Hidrólisis:** En la primera fase, las moléculas de materia orgánica compleja se descomponen en compuestos más simples y solubles en agua, es decir, azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. Los microorganismos de esta etapa liberan enzimas extracelulares, principalmente bacterias hidrolíticas, para descomponer los sustratos orgánicos (Muñoz et al., 2020).

2. Acidogénesis: los productos de la etapa anterior son fermentados por bacterias acidógenas para generar ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes y otros compuestos. Estos metabolitos son primordiales para la producción de biogás, ya que actuarán como sus sustratos para las siguientes etapas (Parra et al., 2019).
3. Acetogénesis: En esta fase, el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono producidos en la etapa anterior se convierten en acetato y otros productos intermedios por bacterias acetogénicas, produciendo sustratos finales para la producción de metano (Suárez et al., 2018).
4. Metanogénesis: En la última fase, las bacterias metanogénicas, la mayor parte del dominio *Archaea*, generan metano de los sustratos finales de las etapas anteriores, es decir, acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son extremadamente sensibles a las condiciones, como el pH y la temperatura, y su actividad es crucial para la producción de biogás. (Muñoz et al., 2020).

2.3 Tecnología y Equipos para la Producción de Biogás

La tecnología y los equipos para la producción de biogás han experimentado un avance significativo durante la última década, debido a la creciente necesidad de soluciones energéticas sostenibles y la gestión eficiente de residuos con la finalidad de reducir el impacto ambiental. Los digestores anaeróbicos modernos, que constituyen la esencia de la tecnología, han mejorado en eficiencia y capacidad, lo que posibilita una descomposición más rápida y completa de la materia orgánica. Dichos digestores están equipados con un sistema de monitoreo avanzado que optimiza las condiciones de temperatura, pH y agitación, maximizando la producción de biogás. Posteriormente, se ha desarrollado unidades de purificación de biogás que permiten eliminar impurezas como el sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, obteniendo un biometano de alta

calidad, el cual puede ser utilizado como combustible vehicular o inyectado a la red de gas natural. Asimismo, los avances en la tecnología de sensores y la automatización han facilitado la operación a distancia y el mantenimiento predictivo de digestores, mejorando la viabilidad económica y sostenibilidad de los proyectos de biogás. (FAO, 2019).

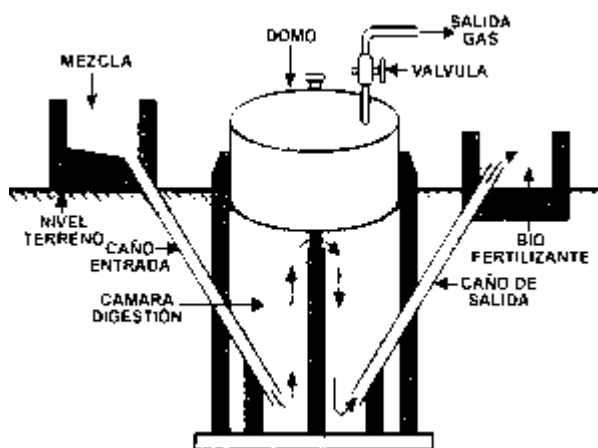
2.3.1 Tipos de Biodigestores

Los biodigestores son fundamentales en la producción de biogás, proporcionando una solución eficiente y sostenible para la gestión de residuos orgánicos y la generación de energía renovable como el biogás, electricidad, calor o como combustible vehicular, mediante la producción del digestato, un subproducto valioso que puede usarse como fertilizante orgánico. La implementación de biodigestores no solo ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y promueve prácticas agrícolas sostenibles. La diversidad en el diseño de biodigestores, van desde sistemas simples y económicos para pequeños agricultores hasta instalaciones industriales avanzadas que permiten su adaptación a diferentes necesidades y escalas de producción, ampliando su impacto positivo en la economía y la gestión ambiental (Barrera et al., 2020). A continuación, se indica algunos tipos de biodigestores más usados:

- Biodigestores discontinuos o por lotes: son sistemas de digestión anaeróbica donde la materia orgánica se carga en una sola operación y se sella herméticamente para permitir la digestión sin adición de nuevos residuos hasta que el proceso se complete. Funcionan en un ciclo de llenado, digestión y vaciado; su diseño es relativamente simple y robusto, consistiendo en un contenedor sellado donde los residuos orgánicos se descomponen por acción de microorganismos anaeróbicos, produciendo biogás que se puede recolectar para usos energéticos. Además del biogás, estos biodigestores generan digestato, un

subproducto rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante orgánico. Son especialmente adecuados para residuos sólidos con bajo contenido de humedad y se utilizan comúnmente en aplicaciones agrícolas debido a su facilidad de operación y mantenimiento (Pérez y Alvarado, 2023).

Figura 2. Modelo de biodigestor discontinuo

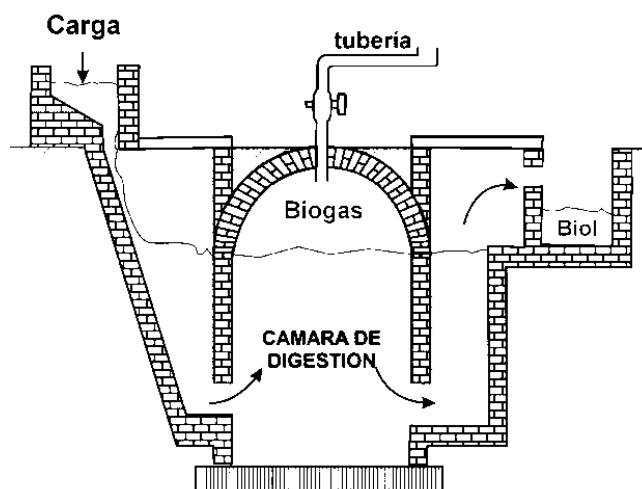


Fuente: tomado de Pérez y Alvarado, 2023

- Biodigestores continuos: son sistemas de gestión anaeróbica donde la materia orgánica se introduce de manera constante o periódica, permitiendo una producción continua de biogás y la salida regular de digestato. Su diseño generalmente incluye un tanque o reactor con un sistema de mezcla que asegura una distribución uniforme de los residuos y la actividad microbiana. Esto se logra manteniendo un balance dinámico entre la entrada de nuevos residuos y la salida del digestato no procesado. Los productos principales de estos sistemas son el biogás, que puede ser usado para producir electricidad, calor o como combustible, y el digestato, un fertilizante orgánico con alto contenido de nutrientes. Sin embargo, los sistemas continuos tienen algunas desventajas, incluido un manejo más exigente que requiere supervisión humana para mantener condiciones de temperatura, pH y carga orgánica. Además, su instalación y operación suelen ser más costosas que la de los

reactores discontinuos, lo que puede limitar su uso en fincas agrícolas más pequeñas o en áreas con menos recursos (Spahr et al., 20219).

Figura 3. Modelo de biodigestor continuo

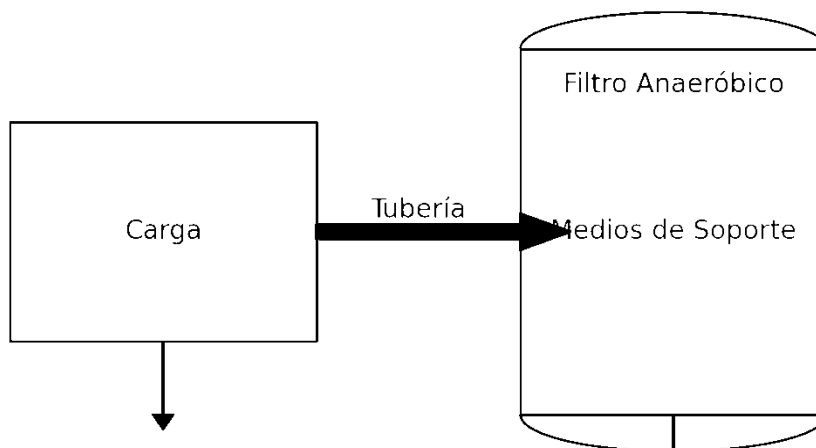


Fuente: tomado de Spahr et al., 20219.

- Biodigestores de semicontinuos: son sistemas de digestión anaeróbica donde los residuos orgánicos se destinan a intervalos regulares, en lugar de manera continua o todo de una vez. Implica un tanque o reactor al que se añaden nuevas cargas de residuos regularmente, mientras que el digestato se elimina bajo un cierto intervalo, permitiendo una producción de biogás más estable en comparación con los sistemas discontinuos. Durante el proceso, los microorganismos anaeróbicos descomponen la materia orgánica, produciendo biogás y digestato, que se puede utilizar como fertilizante. Algunos de los inconvenientes del uso de biodigestores semicontinuos son la necesidad de manejo cuidadoso para garantizar que las condiciones internas permanezcan estables. También, es necesaria una ecuación compleja entre la entrada y la extracción de digestato. A diferencia de los biodigestores continuos, todavía requieren una inversión significativa en infraestructura y mantenimiento para

operar, lo que puede ser restrictivo para su uso en pequeñas explotaciones de cultivo y países económicamente inferiores (Mojica et al., 2021).

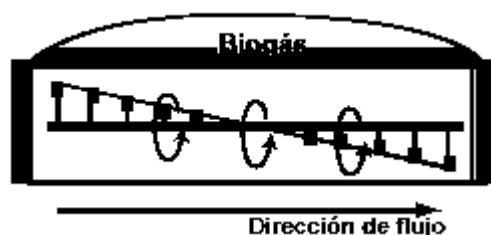
Figura 4. Modelo de biodigestor semicontinuo



Fuente: tomado de Mojica et al., 2021

- Biodigestores de flujo pistón: son sistemas de digestión anaeróbica diseñados para que los residuos orgánicos se desplacen a través del reactor en un flujo unidireccional, similar al movimiento de un pistón. Este diseño consiste en un tanque alargado en el que los residuos se introducen por un extremo y avanzan gradualmente hacia el otro, donde se extrae el digestato. Este flujo uniforme maximiza la eficiencia del proceso de digestión, permitiendo una producción continua de biogás y una conversión más completa de la materia orgánica, donde los productos generados incluyen biogás, principalmente compuesto de metano y dióxido de carbono, y digestato, que puede utilizarse como fertilizante orgánico. Las desventajas se presentan en la necesidad de un control preciso del tiempo de retención y el flujo de residuos, así como posibles dificultades en el manejo de residuos con alta viscosidad o contenido sólido, que pueden obstruir el sistema (Miranda, 2022).

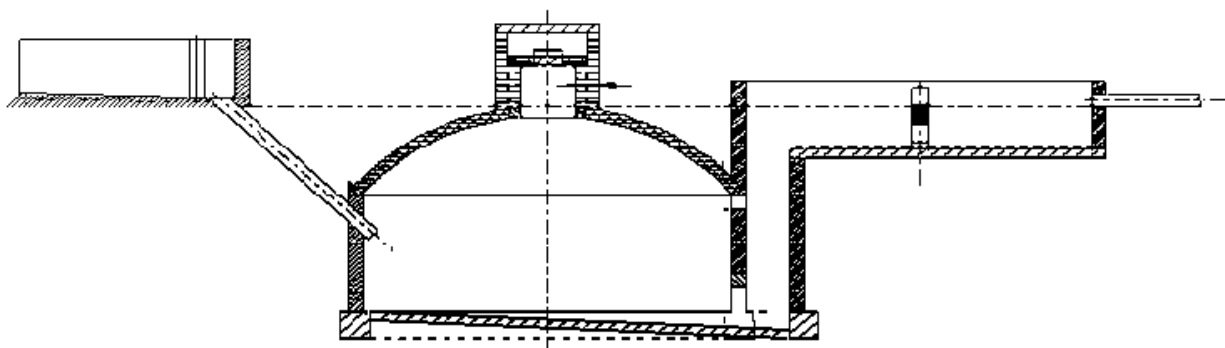
Figura 5. Modelo de biodigestor de flujo pistón



Fuente: tomado de Miranda, 2022.

- Biodigestores de cúpula fija o indios: son sistemas de digestión anaeróbica en los que una estructura rígida en forma de cúpula se utiliza para almacenar el biogás producido. El diseño incluye un tanque subterráneo donde se descomponen los residuos orgánicos, y una cúpula fija sobre el tanque que actúa como almacenamiento de biogás. Funcionan llenando el tanque con materia orgánica y agua, donde los microorganismos anaeróbicos descomponen los residuos, produciendo biogás y digestato. Los productos generados son biogás, que puede utilizarse para cocinar, iluminación y generación de energía, y digestato, que es un fertilizante rico en nutrientes. Las desventajas de este modelo incluyen la dificultad de mantener la presión constante del biogás debido al almacenamiento fijo, y la posible acumulación de lodo en el tanque, que requiere limpieza periódica (González y Rodríguez, 2022).

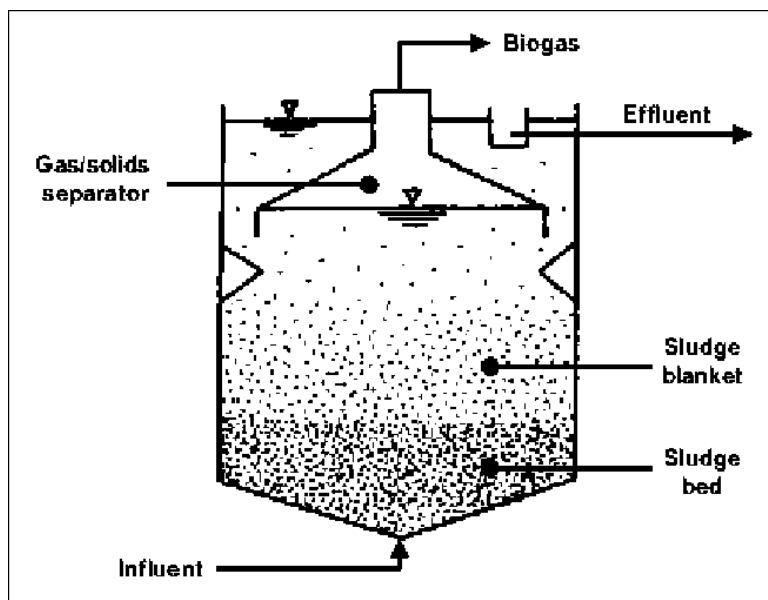
Figura 6. Modelo de biodigestor de cúpula fija



Fuente: tomado de González y Rodríguez, 2022

- Biodigestores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): son sistemas de digestión anaeróbica utilizados principalmente para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, que funcionan mediante un proceso ascendente donde los desechos líquidos fluyen hacia arriba a través de un lecho de lodo anaeróbico, formando una manta de lodo que retiene y trata los contaminantes orgánicos. El diseño típico incluye un reactor cilíndrico vertical con una sección inferior donde se acumula el lodo activo y una sección superior donde se separa el biogás generado. Los productos generados por los biodigestores UASB incluyen biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, y un efluente tratado con un contenido reducido de materia orgánica y contaminantes (Cestonaro et al., 2019).

Figura 7. Modelo de biodigestor UASB

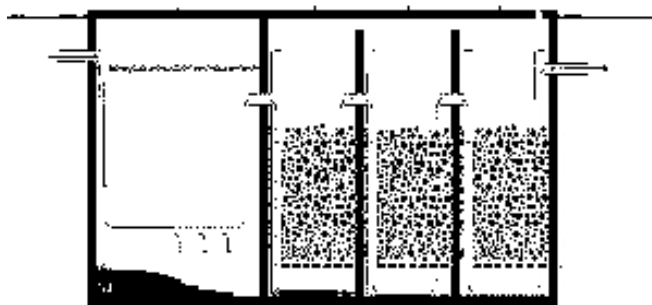


Fuente: tomado de Cestonaro et al., 2019.

- Biodigestores de flujo ascendente o de película fija: son sistemas de digestión anaeróbica utilizados para convertir materia orgánica en biogás y digestato, donde los residuos se introducen en un tanque donde un medio sólido, como piedras o plásticos, proporciona una superficie para que los microorganismos anaeróbicos se adhieran. El flujo de residuos pasa por el medio sólido, permitiendo que los microorganismos descompongan la materia orgánica y generen biogás. Los productos generados incluyen biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, y digestato, un subproducto líquido o semisólido que es rico en nutrientes y puede ser utilizado como fertilizante. Las desventajas de los biodigestores de flujo ascendente pueden incluir la posibilidad de obstrucción del medio sólido por residuos fibrosos o grasas, lo que requiere un mantenimiento regular para garantizar un funcionamiento óptimo; estos sistemas pueden ser más sensibles a variaciones en la carga de alimentación y pueden requerir un control cuidadoso de

parámetros como la temperatura y el pH para mantener una digestión eficiente (Pinargote y Vergara, 2020).

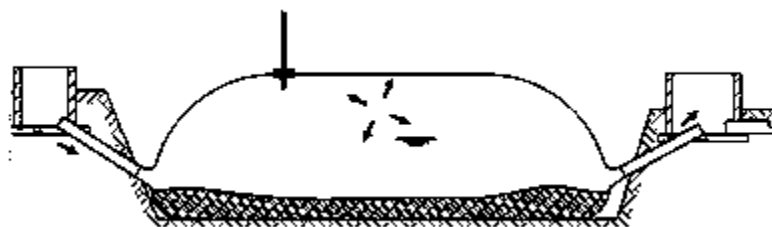
Figura 8. Modelo de biodigestor de flujo ascendente



Fuente. Tomado de Pinargote y Vergara, 2020.

- Biodigestores de bolsa flexibles o tubulares: son sistemas compactos y flexibles utilizados para la producción de biogás en pequeña escala; consisten en bolsas plásticas flexibles, generalmente de polietileno de alta densidad, que se llenan con una mezcla de residuos orgánicos y agua. Estas bolsas están diseñadas para permitir la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, generando biogás como producto principal. Durante el proceso, los microorganismos presentes en los residuos descomponen la materia orgánica, liberando gases como metano y dióxido de carbono. El biogás producido puede ser recolectado y utilizado como fuente de energía para cocinar, iluminación o generación de electricidad; y el digestato líquido que se genera puede utilizarse como fertilizante orgánico en la agricultura. Sin embargo, algunas desventajas de los biodigestores de bolsa tubulares incluyen su menor capacidad en comparación con otros sistemas más grandes y la necesidad de reemplazo periódico de las bolsas debido al desgaste y la degradación, lo que puede aumentar los costos a largo plazo (Ramos et al., 2021).

Figura 9. Modelo de biodigestor tubular



Fuente: tomado de Ramos et al., 2021.

2.4 Fundamentos del biogás

2.4.1 Conceptos básicos sobre biogás

El biogás es un combustible renovable producido a partir de la descomposición anaerobia de materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno. Este gas se compone principalmente de metano (CH_4) del 50% al 70% y dióxido de carbono (CO_2) del 30% al 50%, junto con trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S). Los materiales comunes utilizados para producir biogás incluyen residuos agrícolas, estiércol, desechos de alimentos y aguas residuales. La producción de biogás se lleva a cabo en digestores anaerobios, donde la materia orgánica se descompone y genera gas, que se puede capturar y utilizar como fuente de energía (Ramos C. C., 2022).

2.4.2 Principio de la producción del biogás

La producción de biogás se basa en los principios biológicos y químicos detrás de la capacidad de los microorganismos anaerobios de descomponer la materia orgánica en aire ausente, resultando en la emisión de gases de metano y dióxido de carbono. Este método, conocido como digestión anaerobia, tiene lugar en un reactor designado, digester por anaerobio, donde se gestionan las condiciones presentes para optimizar la producción del biogás. Los factores de

temperatura, pH, y relación carbono nitrógeno impactan la eficiencia y velocidad de biogás diluvina (Gonzalez, 2023).

La producción del producto sigue un proceso de fases. Primero, la materia orgánica se hidroliza en enzimas bacterianas en compuestos más fáciles. Luego, los ácidos orgánicos resultantes fermentan en ácidos grasos volátiles, acetato e hidrógeno. Finalmente, estos productos fermentados, principalmente metano y dióxido de carbono, se producen en el biogás por bacterias metanogénicas, donde la eficiencia del proceso se determina por diversas variables, incluidos los propios sustratos (Rodríguez A. , 2019).

2.4.3 Factores que afectan la producción del biogás

Los factores pueden afectar el rendimiento y eficiencia en la producción del biogás, entre ellos se incluyen las características del sustrato, como su composición química, la relación carbono/nitrógeno y la disponibilidad de nutrientes. Los sustratos ricos en materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol o desechos de alimentos, tienden a producir mayores cantidades de biogás en comparación con materiales menos biodegradables (Quinchía et al., 2019).

Otro factor importante es la temperatura del digester anaerobio, ya que la actividad microbiana óptima se alcanza dentro de un rango específico de temperatura, generalmente entre 35°C y 55°C. Variaciones en el pH del sistema también pueden afectar la producción de biogás, ya que los microorganismos anaerobios son sensibles a los cambios en la acidez del medio ambiente. El biogás digerido por la digestión anaerobia tiene un mejor rendimiento a un pH de 6.8 a 7.5 debido a la actividad optimizada de los microorganismos metanogénicos. Cualquier aumento o disminución del rango de pH desencadena la acumulación de ácidos grasos volátiles si el pH es inferior a 6.5, lo que inhibe la metanogénesis y almacenamiento de biogás, mientras que el pH de 8.0 causa una perturbación al inhibir la actividad claramente de las bacterias acidogénicas y

metanogénicas. La mezcla y homogeneidad del sustrato dentro del digestor también son importantes, ya que una distribución uniforme asegura un acceso adecuado de los microorganismos a la materia orgánica (Accostupa et al., 2019).

Simultáneamente, factores perseguidos del proceso biológico, operativos y de gestión también pueden influir en la producción del biogás. Tanto el diseño y configuración del sistema de digestión, el tiempo de retención hidráulico y los sólidos tiempo de retención son críticos y factores que pueden afectar el proceso de los volúmenes en términos de eficiencia. La cantidad de carga orgánica manejada, la eliminación de inhibidores potenciales y para evitar la acumulación de subproductos tóxicos es también alta para producir biogás (Carrera y Suárez, 2019).

2.4.4 Usos y aplicaciones del biogás

El biogás generado a partir de los lodos residuales puede ser utilizado para alimentar generadores eléctricos, lo que permite la producción de energía eléctrica de manera sostenible y renovable. Al utilizar el biogás como fuente de energía, se reduce la dependencia de recursos no renovables y se disminuye la emisión de gases de efecto invernadero. Este enfoque no solo contribuye a la gestión eficiente de los residuos, sino que también proporciona una solución energética ecológica, apoyando el desarrollo de infraestructuras energéticas más verdes y sostenibles (Devia y Yate, 2022).

El biogás se quema gracias a los sistemas de cogeneración que permite la generación simultánea de electricidad y calor, maximizando así la eficiencia del uso de energía. Por lo tanto, la cogeneración se clasifica entre las formas eficientes de uso de biogás. A primera vista, no representa una ventaja en comparación con la generación de energía tradicional. Sin embargo, se debe tener en cuenta que: “no todos los sistemas de generación de energía convencionales también utilizan el calor residual para la generación”. En consecuencia, forma una solución integral para

enfrentar las diversas demandas de energía. Además, dado que el sistema usa biogás, tiene un impacto positivo en el medio ambiente. La generación de biogás emite mucho menos “gases de efecto invernadero que otras fuentes de energía renovable”. La cogeneración con biogás no solo mejora la eficiencia general del uso de energía, sino que también reduce el impacto humano en el medio ambiente cancelando las emisiones (Martinez, 2023).

El biogás puede ser refinado para producir biometano, un gas con calidades semejantes a las del gas natural que puede ser inyectado en dicha red. La inyección de biometano en la red de gas natural también amplía las fuentes de energías renovables a disposición del consumidor para usos domésticos e industriales. Además, el biometano puede ser utilizado como combustible para vehículos, ofreciendo una alternativa más limpia y sostenible a los combustibles fósiles tradicionales. Este proceso no solo mejora la eficiencia energética del biogás, sino que también contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, apoyando la transición hacia una economía más verde y baja en carbono (Hidalgo et al., 2020).

CAPÍTULO III

3. Metodología

3.1 Descripción del área de estudio

Para el desarrollo de la presente investigación se recolectaron datos sobre la PTAR-I, ubicada en la ciudad de Ibarra en la dirección Avenida Carchi y María Angélica Idrobo a las orillas del río Tahuando. Esta instalación está dentro de la provincia de Imbabura, Ecuador, que se localiza a N 0°35'23,823" O 78°6'49.268" y altura de 2224 m.s.n.m. El clima es cálido templado con temperatura media anual de 17°C aproximadamente.

Figura 10. Ubicación de la PTAR-I



Fuente: *Google maps*

3.2 Diseño y tipo de estudio

El diseño de la investigación fue de tipo descriptivo y documental, ya que se basó en la recopilación, selección y síntesis de información relevante obtenida en fuentes secundarias, como artículos científicos, informes técnicos, legislación ambiental, estudios de casos y literatura existente sobre tecnologías de tratamiento de aguas residuales y producción de biogás. Para evaluar la viabilidad y el potencial de producción del biogás en la planta de tratamiento de aguas residuales

de Ibarra, este trabajo tomó en cuenta los aspectos técnicos y ambientales. En este sentido, la metodología seleccionada fue la revisión bibliográfica, que permitió la identificación de las mejores prácticas, tecnologías aplicables y beneficios relevantes asociados a la implementación de las tecnologías de producción de biogás en la PTAR mencionada.

3.3 Descripción del método de investigación

3.3.1 Describir las tecnologías de digestión anaerobia disponibles para el tratamiento de lodos residuales y la producción de biogás.

Para cumplir con el primer objetivo específico, se redactó una revisión documental exhaustiva de la literatura basada en referencias científicas, técnicas y regulatorias pertinentes. La recopilación de datos se realizó utilizando técnicas de búsqueda avanzadas y formales en las principales bases de datos académicas, incluyendo Scopus, Web of Science y Google Scholar, buscando variedades de palabras clave como "digestión anaeróbica", "biodigestores", "producción de biogás", "tecnologías de tratamiento de lodos" y "residuos orgánicos".

El criterio de selección priorizó el material bibliográfico publicado en los últimos 10 años (2015–2025) en idioma inglés y español, dando a conocer la actualización por la que ha pasado el contenido. La información recopilada permitió organizar el Capítulo I - Marco Teórico, donde se presentan los fundamentos, tipos de biodigestores, conceptos microbiológicos y las variables que afectan la eficiencia de la digestión anaeróbica.

3.3.2 Investigar el impacto ambiental de la producción de biogás a partir de lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas.

Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura en bases de datos académicas y bibliotecas digitales. Se utilizaron palabras clave relacionadas con biogás, lodos y tratamiento de aguas residuales para buscar en revistas de Scopus, Web of Science y Google Scholar.

Se seleccionaron documentos, literatura científica, materiales técnicos o estudios de caso, priorizando aquellos elementos con mayor relevancia y cualidades científicas.

De esta manera, se realizó un análisis exhaustivo de estas fuentes elegidas por su calidad científica y toda la información se destiló para identificar técnicas avanzadas, condiciones óptimas para la producción de biogás, impactos ambientales y económicos, y lecciones aprendidas de fracasos pasados.

Finalmente, los hallazgos se tradujeron en la sección de resultados, proporcionando una visión completa y bien fundamentada sobre la viabilidad de la producción de biogás en la planta de Ibarra y sus posibles beneficios sobre la producción de biogás en alambiques en la planta de tratamiento de Ibarra.

3.3.2.1 Estrategia de Búsqueda

Se utilizaron las estrategias de búsqueda en dos fases de acuerdo con el enfoque del método PRISMA (Elementos de Informes Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis) Figura 1. En la primera fase se definió la lista de palabras clave y términos relacionados con el tema, como el biogás, el lodo residual, la planta de tratamiento de aguas residuales, los términos que se utilizaron para la búsqueda en bases de datos académicas conocidas, como Scopus, Web of Science, y Google Scholar. Se definieron los criterios de inclusión y exclusión de artículos con respecto a su idioma, su publicación hace más de 10 años, su selección relacionada con el tema.

La metodología PRISMA consta de varias etapas en las que, tareas iniciales para la literatura buscada que estaba relacionada con el tema que se identificó y se eliminaron los duplicados. Luego, se evaluaron los títulos y resúmenes y se seleccionaron los estudios que eran potencialmente relevantes. Se revisó el texto completo y se realizó un análisis de la pertinencia y la calidad de los documentos. Los resultados obtenidos de las fases por la metodología del

diagrama de flujo PRISMA con la cantidad de estudios identificados, incluidos y evaluados, como retratado en la Figura 1. Este enfoque sistemático y transparente para la selección de fuentes de información y garantiza la validez y confiabilidad de los hallazgos (Pagea et al., 2021).

3.3.2.2 Criterios de Selección de Información

Para mantener un alto rigor de la calidad, relevancia y validez, se ha escogido los criterios de inclusión y exclusión orientados específicamente a parámetros técnicos relacionados con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ibarra (PTAR-I) y con los procesos de digestión anaerobia para producción de biogás. A continuación, se presenta al Tabla 1 con los criterios aplicados:

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión

Criterio	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Tipo de estudio	Artículos científicos indexados, tesis experimentales y reportes técnicos con datos medibles.	Revisiones generales, informes no técnicos, páginas web sin validación científica.
Idioma	Español e inglés.	Otros idiomas.
Fecha de publicación	Publicaciones entre 2015 y 2025.	Publicaciones anteriores a 2015.
Parámetros técnicos	Estudios que incluyan datos de DQO, sólidos totales/volátiles, pH, rendimiento de biogás, cantidad de lodos.	Estudios que no reporten parámetros técnicos de calidad de biogás ni datos de lodos.
Tipo de intervención	Procesos de digestión anaerobia aplicados a lodos residuales de PTAR o similares.	Métodos de tratamiento de lodos distintos a digestión anaerobia (ej. compostaje, incineración).
Resultados esperados	Reporte de indicadores de cantidad, composición y calidad del biogás producido.	Estudios sin resultados cuantitativos sobre biogás.
Publicaciones duplicadas	Únicas.	Duplicadas.

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Análisis y Organización de la Información

La información recopilada será analizada y organizada de manera sistemática para garantizar una comprensión completa y consistente. Después de haber seleccionado la información a través de PRISMA, cada documento será leído detenidamente con sesgo crítico. Los datos relevantes serán extraídos siguiendo una matriz de extracción en la que se incluirán las variables

de tecnología de digestión anaerobia, eficiencia de producción de biogás, y los parámetros operativos empleado (pH, temperatura, tiempo de retención), beneficios ambientales y económicos, y posibles desventajas. La matriz permitirá una recopilación estructurada de los datos y ayudará a identificar patrones y contribuciones comunes en la literatura. La información será organizada por medio de la categorización de temas identificados y los estudios serán agrupados en función de los aspectos técnicos, económicos y medioambientales estudiados.

La información se presentará a través de una tabla con el fin de permitir una rápida visualización y facilitar el análisis y la comparación entre estudios. Se resumirá la descripción de los resultados de los estudios y se destacará las mejores prácticas identificadas y las tecnologías más efectivas para la producción de biogás a partir de lodos residuales. Este enfoque permitirá una discusión crítica fundamentada y permitirá identificar posibles oportunidades y desafíos para la implementación de estas tecnologías en la planta de tratamiento de agua residuales en Ibarra.

3.3.3 Elaborar una propuesta del aprovechamiento potencial del biogás producido a partir de los lodos residuales de la PTAR-I.

La propuesta de este trabajo se llevó a cabo sobre la base de los hallazgos de revisión documental y sistemática, y se desarrolló un análisis contextual de la PTAR-I en términos de su ubicación y tipo, capacidad operativa, volumen de lodos generados y condiciones climáticas. Se elaboró una propuesta en forma de propuesta alternativa razonable e innovadora seleccionando tecnologías de digestión anaerobia adecuadas que se adaptan a este entorno en términos de datos locales, incluidos criterios técnicos y ambientales. Se proporcionaron recomendaciones para la mejora del proceso de producción de biogás, en particular, recomendaciones para el proceso de mitigación de impacto ambiental y recomendaciones para la producción de biogás.

CAPÍTULO IV

4. Resultados y Discusión

4.1 Resultados

El presente capítulo consistió en el análisis de resultados y la discusión de la revisión bibliográfica del impacto ambiental de la producción de biogás a partir de lodos residuales. Regido bajo el paradigma sistemático, el capítulo en cuestión permitió llevar a cabo una evaluación minuciosa de la literatura disponible, asumiendo conocimiento sobre las características de los lodos y el biogás, los métodos utilizados y los beneficios asociados con la producción de biogás en general y desde una perspectiva ecológica.

4.1.1 Evaluación de las tecnologías más óptimas de digestión de lodos residuales para la obtención de biogás en la PTAR-I.

En las etapas previas de la investigación, un análisis detallado basado en la revisión bibliográfica de las principales tecnologías de digestión anaerobia correspondientes a los lodos residuales y la producción de biogás. Este enfoque permite determinar el distrito de mejora, las desventajas de lucro y otros. Sobre la base de esa revisión documentada, en esta sección se presentan los resultados derivados de la evaluación específica para la PTAR-I, con el fin de identificar las tecnológicas que son más óptimas, considerando las características del caudal, los volúmenes de lodos generados y las condiciones ambientales propias de la planta.

A partir de la revisión previa se elaboró una matriz comparativa en la que se sistematizan las características de digestores anaerobios discontinuos, continuos, semicontinuos, de flujo pistón, de cúpula fija, UASB, de flujo ascendente y tubulares (Ver Tabla 2). Cada tecnología evidencia condiciones particulares: algunas destacan por su simplicidad operativa y bajo costo inicial, mientras que otras ofrecen mayor eficiencia energética y estabilidad microbiológica, aunque

demandan un control estricto de parámetros como pH, temperatura o tiempo de retención. Estas diferencias constituyen la base para la selección de alternativas acordes con las características de los lodos generados en la PTAR-I.

Los resultados del registro de caudales de 2024 se tomaron de los documentos de Memoria Descriptiva de la Planta 144201-000-JRS-0001 (2014) y el registro detallado del caudal correspondiente al año 2024 de la PTAR-I, donde se muestran un ingreso mensual promedio de 749.929 m³, de los cuales se trataron 652.395 m³. La producción de biogás fue variable, con máximos de 38.854 m³/mes en agosto y mínimos de 7.604 m³/mes en enero, alcanzando un total anual de 181.649,9 m³. De igual manera, se evidenció una producción de biosólidos acumulada de 932.923 m³ y una generación total de lodos de 802.773 kg, con picos significativos en determinados meses. Estas fluctuaciones confirman la necesidad de tecnologías que garanticen continuidad y eficiencia en condiciones de variabilidad operativa.

Considerando estos datos, se identifican dos alternativas como las más adecuadas para la PTAR-I: los digestores UASB y los digestores de flujo pistón. Los primeros destacan por su alta eficiencia en la estabilización de materia orgánica, su diseño compacto y la posibilidad de recircular lodos, optimizando así la actividad microbiana en condiciones de cargas variables. Sin embargo, los digestores de flujo pistón ofrecerían la ventaja de permitir el control del tiempo de retención y una producción constante de biogás que se adapte a la variabilidad mensual en la cantidad y calidad de lodo.

Estos últimos son considerados más ideales, ya que el UASB es un biodigestor de eficiencia debido a la alta remoción que presenta en aguas residuales con cargas orgánicas como sólidos suspendidos a tratar. Destaca su diseño, ya que presenta una zona superior de sedimentación efectiva para la retención de sólidos suspendidos; en consecuencia, además se da una recirculación

interna del lodo, lo cual optimiza el proceso anaeróbico debido a que se mantienen condiciones estables para la actividad microbiana. Comparados a otros sistemas, estos biodigestores presentan una menor necesidad de tiempo de retención hidráulica para operar y menor espacio físico, lo que es beneficioso debido a que la PTAR-I presenta problemas de espacio espacial, así como problemas operativos (Cestonaro et al., 2019).

La implementación de biodigestores no sólo permitiría una producción adicional de biogás, además ayudaría al manejo más eficiente y sostenible de residuos en la planta. Por lo tanto, los resultados de este estudio confirman que la aplicación de biodigestores avanzados es una alternativa que resulta ser tanto técnica como ambientalmente factible para mejorar la gestión de los lodos y fortalecer la producción energética renovable en PTAR-I.

Su diseño tipo pistón destacaría como una alternativa ideal debido a su capacidad ofrecida al controlar el tiempo de retención hidráulica y sólidos. Asegurando una degradación final óptima y constante de la materia orgánica, lo cual proporcionará un biogás constante, esta característica se considera primordial un buen digestor pistón, esto le permitirá adaptarse a la variabilidad mensual en la generación de lodos y carga orgánica y mantener estable el proceso productivo, debido a que mensualmente se observan variaciones considerables en la generación de lodos y en la carga orgánica en la PTAR-I (Barrera y otros, 2020; Miranda, 2022).

Los biodigestores mejoran significativamente la producción de biogás, dado que ofrecen condiciones más favorables para la actividad microbiana anaeróbica, y se capean las condiciones críticas como el tiempo de retención hidráulica, temperatura y mezcla interna. Esto maximiza la conversión de residuos en biogás, promoviendo una mayor generación energética y proporcionando una solución ambientalmente sustentable para la gestión integral de residuos generados en la PTAR-I (Devia & Yate, 2022; Gállego, 2021)

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los digestores anaerobios

Tipo de Digestor Anaerobio	Ventajas Detalladas	Desventajas Detalladas
Discontinuo (Batch)	<p>Buen rendimiento en producción puntual de biogás.</p> <p>Adecuado para estabilización de lodos residuales con alto contenido de sólidos.</p> <p>Reducción considerable de patógenos por tiempos prolongados de retención.</p> <p>Operación sencilla y económica en pequeñas escalas.</p>	<p>Producción de biogás no es constante (proceso por lotes).</p> <p>Requiere control riguroso del pH y temperatura para mantener estabilidad microbiológica.</p> <p>Mayor acumulación de H₂S al permanecer largo tiempo sin extracción constante del gas.</p>
Continuo Agitado (CSTR)	<p>Producción constante y eficiente de biogás.</p> <p>Alto grado de estabilización de lodos con significativa reducción de volumen.</p> <p>Reducción eficiente de patógenos gracias a tiempos de residencia controlados y uniformes.</p> <p>Distribución homogénea de temperatura y pH por medio de la agitación.</p>	<p>Requiere alto consumo energético para la agitación continua.</p> <p>Necesita monitoreo estricto y continuo del pH y temperatura.</p> <p>Alta posibilidad de corrosión en equipos debido a la acumulación permanente de H₂S.</p>
Semicontinuo	<p>Producción regular de biogás, superior al sistema discontinuo.</p>	<p>Control periódico pero riguroso de parámetros operacionales como pH y temperatura.</p>
Flujo Pistón	<p>Buena reducción del volumen de lodos y estabilización efectiva de los mismos.</p> <p>Tiempo suficiente para reducción significativa de patógenos.</p> <p>Excelente eficiencia en producción continua y estable de biogás.</p> <p>Alto nivel de estabilización y reducción de patógenos debido al control preciso del tiempo de retención.</p> <p>Eficaz reducción del volumen de lodos.</p>	<p>Riesgo de fluctuaciones en producción de biogás.</p> <p>Acumulación periódica de H₂S, potencialmente corrosivo.</p> <p>Requiere control estricto del flujo, temperatura y pH.</p> <p>Propenso a la acumulación localizada de H₂S en ciertas zonas del reactor.</p> <p>Sensible a cambios bruscos en las características del lodo, aumentando el riesgo de obstrucciones.</p>
Cúpula Fija (Modelo Indio)	<p>Estructura robusta y duradera.</p> <p>Integración de almacenamiento directo de biogás.</p> <p>Buena reducción de volumen de lodos y estabilización prolongada, disminuyendo patógenos.</p>	<p>Difícil mantener temperatura y agitación uniformes.</p> <p>Acumulación significativa de compuestos corrosivos como el H₂S debido a tiempos prolongados sin extracción constante.</p> <p>Dificultad en control constante del pH.</p>
UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	<p>Alta eficiencia en producción constante y elevada de biogás.</p> <p>Excelente estabilización de materia orgánica con reducción notable de patógenos.</p>	<p>Alta sensibilidad a variaciones de temperatura y pH, demandando controles estrictos y especializados.</p> <p>Riesgo elevado de acumulación de H₂S en el gas producido, requiriendo sistemas adicionales para remoción de corrosivos.</p>

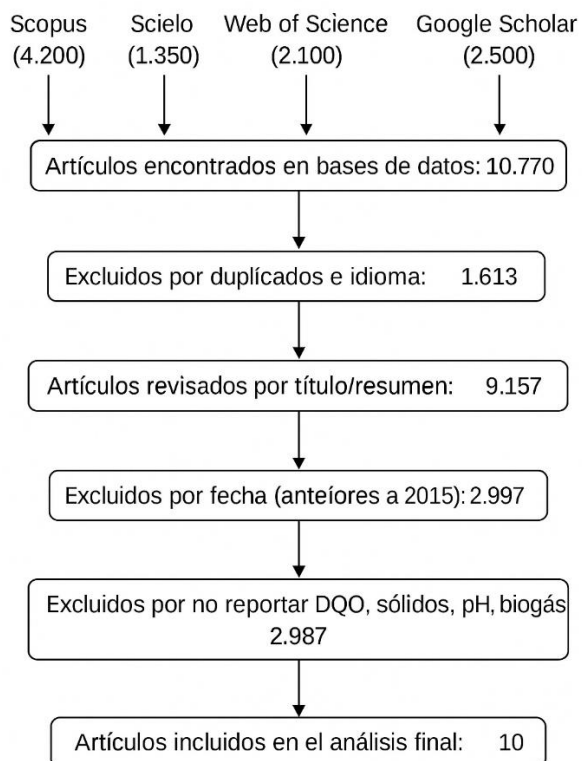
Flujo Ascendente (Filtro Anaerobio)	<p>Reducción efectiva del volumen de lodos, minimizando necesidades de disposición final.</p> <p>Compacto, menor espacio requerido.</p> <p>Producción constante y eficiente de biogás.</p> <p>Eficiente reducción de lodos y estabilización microbiológica.</p> <p>Disminución efectiva de patógenos debido a una buena adherencia microbiológica sobre el soporte fijo.</p> <p>Adecuado especialmente para aguas residuales con baja concentración de sólidos.</p>	<p>Exige riguroso control de temperatura y pH para mantener actividad biológica óptima.</p> <p>Riesgo alto de obstrucción debido a sólidos o grasas acumuladas en el soporte.</p> <p>Generación frecuente de H₂S que afecta la vida útil del soporte.</p>
Bolsa Flexible o Tubular	<p>Bajo costo inicial y sencillo montaje.</p> <p>Producción aprovechable de biogás, especialmente a pequeña escala.</p> <p>Buena estabilización y reducción moderada de patógenos en condiciones controladas.</p>	<p>Necesidad de reemplazo frecuente debido al desgaste del material.</p> <p>Difícil mantener condiciones constantes de temperatura y agitación.</p> <p>Acumulación potencialmente significativa de H₂S que deteriora rápidamente el material y puede ser corrosivo para otros equipos.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Impacto ambiental del proceso del aprovechamiento de biogás a partir de lodos residuales en las plantas de tratamiento de aguas

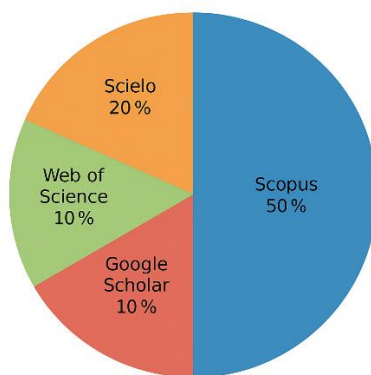
En la Figura 11, se presentan los resultados obtenidos de la búsqueda en las diferentes bases de datos como NCBI, Google scholar, Elsevier, Scopus, entre otras usando como términos de búsqueda “Biogás, subproductos de lodos residuales, biogás obtenido de lodos residuales, impacto ambiental del biogás”; dando como resultado un total de 10770 documentos, luego de filtrarlos por idioma y eliminar los documentos duplicados se obtuvieron 9157 documentos, luego se filtraron por fecha de antigüedad desde el 2014 hasta el presente, donde se obtuvieron 2997 elegibles, a estos se los volvió a filtrar bajo los criterios de inclusión y exclusión dando como resultado final 10 artículos óptimos para el análisis bibliográfico.

Figura 11. Diagrama PRISMA para selección de estudios



Fuente: elaboración propia

Figura 12. Distribución porcentual de los artículos seleccionados según base de datos



Nota: La figura muestra la proporción de los 10 artículos científicos seleccionados para la revisión bibliográfica, clasificados según la base de datos de procedencia. Scopus concentra el 50% de los estudios, seguido por Scielo con el 20%, mientras que Web of Science, Google Scholar y Elsevier aportan cada uno el 10%. Fuente: Elaboración propia

La evaluación realizada bajo la metodología PRISMA señala múltiples externalidades ambientales negativas asociadas al manejo final de los fangos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Entre los daños sobresalientes se evidencian la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de lixiviados con potencial contaminante, y el riesgo sanitario derivado de la sobrevivencia de patógenos, tales como *E. coli* y *Salmonella* (Méndez, 2024). Entre los diferentes gases emitidos, el metano (CH₄) se perfila como el de mayor relevancia, ya que su liberación descontrolada en instalaciones que carecen de un sistema de captura de biogás agrava de forma crítica el proceso de cambio climático global y acentúa la presión sobre los balances de carbono (Montes y Menéndez, 2010).

Una segunda cuestión crítica es la concentración de metales pesados, especialmente plomo, mercurio y cadmio, detectada en los lodos. Si se incorporan a los suelos sin aplicar un tratamiento que los elimine, los metales se infiltran en el suelo y en los cultivos, repercutiendo en la salud de los ecosistemas y en la salud pública (Broche, 2020). En respuesta, la producción de biogás a través de digestión anaerobia se perfila como una estrategia integral: permite la valorización de los lodos y, a la vez, genera energía renovable. En este proceso, la materia orgánica se descompone en condiciones anaerobias, produciendo un volumen significativamente menor de lodos y un biogás que presenta un rendimiento energético superior (Sánchez M., 2023).

Las más recientes tendencias en pretratamientos han revelado la capacidad de aumentar la eficacia de la digestión anaerobia, promoviendo tanto la descomposición de la biomasa como la acumulación posterior de biogás mediante la calibración de variables que activan a los consorcios microbianos de interés. La hidrólisis térmica se halla en este contexto como un caso práctico representativo, dado que la exposición de los lodos a condiciones de temperatura y presión elevadas provoca una ruptura sistemática de los tejidos celulares, proceso que a su vez prepara a

los sustratos para la digestión anaerobia y optimiza la generación de biogás, tal como han evidenciado GuriEFF et al. (2018). Pese a sus sobresalientes métricas de rendimiento, la técnica implica un consumo energético elevado y, si su operativa es deficiente, puede desencadenar impactos negativos sobre el entorno, tal y como han documentado Guananga et al. (2024). Esta dualidad hace que la opción requiera un análisis exhaustivo considerando el ciclo de vida de la instalación y los dispositivos de control que mitiguen los riesgos ambientales.

El enfoque integrador propuesto por López et al. (2021) ofrece una opción prometedora al articular, en una única plataforma, calentamiento térmico, procesos electroquímicos y bioaumentación. El calentamiento favorece la solubilización de residuos sólidos, la intervención electroquímica ocasiona la fragmentación de membranas celulares y, a continuación, la bioaumentación modifica la estructura microbiana en función de las nuevas cargas. Esta secuencia, concebirla como un proceso unitario, incrementa las tasas de conversión de compuestos de difícil degradación y, simultáneamente, eleva la producción de metano.

Las técnicas electroquímicas, en permanente evolución, aplican corriente eléctrica para reducir la resistencia de los flujos de lodo. Entre ellas, la electrocoagulación y la electrooxidación han mostrado relevancia. La electrocoagulación provoca la aglomeración de sólidos por la generación de flóculos a través de reacciones electrolíticas, mientras la electrooxidación convierte compuestos solubles en especies más sintetizables por los microbios, disminuyendo al mismo tiempo la carga orgánica medida como DQO. Sin embargo, los elevados requerimientos energéticos para estas reacciones y la posible generación de subproductos tóxicos, que afectan adversamente la limitada actividad metabólica de los microbios inoculados, persisten como limitaciones técnicas que demandan una personalización y una optimización rigurosas de cada unidad de operación (Alcázar, 2023).

La estrategia de bioaumentación mediante inoculación de consorcios microbianos seleccionados, que comprenden bacterias acidogénicas y metanogénicas, ha demostrado su capacidad para degradar compuestos de alta estabilidad química y para aumentar de modo significativo las tasas de producción de biogás (Gállego, 2021). Sin embargo, el éxito de este enfoque depende de la afinidad ecológica de los nuevos microbios con la biota indígena y de los parámetros de operación del digestor. De este modo, resulta imprescindible realizar una caracterización exhaustiva de la comunidad microbiana del reactor antes de cualquier intervención (Martínez, 2021).

La estructura del lodo, caracterizada por sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno (DQO), pH y el contenido de nutrientes, condiciona de forma decisiva el volumen y la calidad del biogás generado. Se ha observado que los lodos con un predominio de carbohidratos y lípidos presentan un potencial metanogénico superior al de otras fracciones, mientras que la degradación de proteínas produce acumulación de amonio, un compuesto que inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas (Alania & Inga, 2022). De forma complementaria, las condiciones operativas del reactor, como la temperatura, el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la carga orgánica, controlan la acumulación de biogás, por lo que resulta crítico establecer y mantener regímenes óptimos para maximizar tanto la producción como la calidad del biogás obtenido (Criollo & Rodríguez, 2022).

El mantenimiento del pH en un nivel óptimo para el aislamiento microbiano, situado generalmente entre 6,5 y 7,5, es un condicionante crítico que permite maximizar la actividad microbiana del sistema. La desviación puntual o sostenida de este intervalo provoca la desaceleración de la biomasa digestora, generando descensos bruscos en la producción de biogás, como evidencian los estudios de Llumiquinga (2018) y de Manobanda y Valdez (2020).

Paralelamente, la acumulación de contaminantes tóxicos, incluidos el ion amonio, metales pesados y compuestos fenólicos, interfiere negativamente en el funcionamiento del consorcio metanogénico. Sin embargo, el empleo de técnicas de pretratamiento adecuadas, sumado a la inoculación con comunidades microbianas preseleccionadas y de reconocida resistencia, permite mitigar sustancialmente los efectos adversos, tal como concluye Devia y Yate (2022).

Por otro lado, en la PTAR de Ibarra juega un papel crucial en la gestión ambiental urbana, ya que los lodos residuales generados en este proceso son producto del tratamiento primario y secundario, que tras procesos de sedimentación y biológicos generan sólidos espesados con una concentración aproximada de 45 kg/m^3 . Estos lodos se someten a una digestión anaerobia en un digester con capacidad para $3,369 \text{ m}^3$, diseñado para manejar $8,811.31 \text{ kg/día}$ de lodo, logrando una estabilización efectiva que reduce significativamente los patógenos y el volumen del material, facilitando su posterior manejo.

El proceso de digestión anaerobia implementado permite la producción de biogás compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás tiene una producción significativa estimada en aproximadamente 550 m^3 almacenados en gasómetros de membrana, que luego se destinan a usos energéticos, específicamente en motores para la generación de electricidad (142 kWe). Este aspecto energético representa un impacto ambiental positivo considerable, ya que aprovecha un subproducto que de otra forma podría ser un contaminante atmosférico.

Entre otros subproductos generados en la PTAR se destaca el lodo deshidratado, que, tras un proceso adicional de secado térmico solar, puede convertirse en un recurso similar en poder calorífico al carbón, apto para ser reutilizado como combustible alternativo o fertilizante agrícola,

disminuyendo así la necesidad de disponer estos materiales en vertederos y promoviendo la economía circular.

Sin embargo, existen impactos ambientales negativos inherentes al proceso de tratamiento. Uno de los principales problemas es la generación de olores provenientes del pretratamiento, espesamiento y deshidratación de lodos, los cuales requieren sofisticados sistemas de desodorización química y por carbón activado para minimizar la contaminación atmosférica. Asimismo, la operación y mantenimiento de los equipos generan emisiones indirectas de gases contaminantes derivadas del consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles utilizados en procesos auxiliares y transporte interno y externo de materiales. Estos gases, aunque en menores cantidades, contribuyen al efecto invernadero.

La generación de aguas residuales secundarias derivadas del lavado y mantenimiento de instalaciones, junto con la gestión de arenas y grasas extraídas del pretratamiento, también plantea riesgos potenciales de contaminación del suelo y cuerpos de agua cercanos si no se manejan adecuadamente. Además, existe el riesgo de acumulación de metales pesados y sustancias químicas provenientes de detergentes y productos de limpieza, que podrían afectar negativamente la calidad ambiental y la salud pública si se liberan al medio sin control adecuado.

Entre los impactos ambientales positivos destacables están la reducción significativa de carga orgánica (DBO5, DQO), sólidos suspendidos y nitrógeno en el agua residual que retorna al medio ambiente, mejorando notablemente la calidad del río Tahuando. Esto favorece la recuperación de la biodiversidad acuática y contribuye a la protección de la salud pública al disminuir los riesgos asociados a la contaminación hídrica. Además, la generación y utilización del biogás como fuente de energía renovable representa una contribución sustancial a la reducción

de la dependencia energética de fuentes fósiles y una mejora significativa en términos de sostenibilidad ambiental y económica.

4.1.3 Propuesta de mejora del biogás en la PTAR-I

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Ibarra (PTAR-I) actualmente procesa aguas residuales municipales mediante sistemas biológicos anaerobios, especialmente digestores anaerobios, que facilitan la producción de biogás como subproducto. Este biogás se compone principalmente de metano en un 72,60%, una concentración significativa que permite su uso eficiente como recurso energético renovable. Además, contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) con concentraciones aproximadas de 204 ppm, y pequeñas cantidades de oxígeno que afectan potencialmente la calidad y aplicación tecnológica del biogás generado. A pesar de las condiciones operativas actuales, estudios previos evidencian oportunidades sustanciales para mejorar el rendimiento y aprovechamiento de este recurso mediante la optimización del proceso anaerobio y la implementación de técnicas avanzadas de control y manejo microbiológico.

Esta planta está localizada en la parroquia el Sagrario, justamente al lado del río Tahuando. Cumple un rol fundamental en la descontaminación de este río, al tratar alrededor del 90% de las aguas residuales domésticas e industriales generadas en el área urbana. A pesar de esto, la infraestructura presenta una serie de limitaciones operativas, tecnológicas y ambientales que disminuyen su eficiencia y ponen en peligro su sostenibilidad. La producción abundante de lodos residuales, la valorización energética del biogás producido, y la emisión de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en concentraciones perjudiciales se mencionan como las problemáticas más relevantes.

En cuanto al equipamiento, la PTAR-I tiene un sistema convencional de tratamiento que consta de las siguientes unidades: pre-tratamiento: rejillas, desarenador y desengrasador, tratamiento primario: sedimentadores, tratamiento secundario biológico: reactores anaerobios tipo

UASB -Unidades de digestión de lodo. El esquema operativo incluye también canales de descarga, sistema de distribución de caudales, tuberías de conducción, válvulas de control, sensores de flujo y módulos de decantación. Sin embargo, se ha documentado la ausencia de tecnologías especializadas para la purificación del biogás generado, así como la falta de instrumentación automatizada para el monitoreo de gases ácidos y de dispositivos de control de emisiones, como biofiltros o unidades de scrubbing.

Uno de los principales hallazgos técnicos reportados en estudios recientes es la elevada presencia de H_2S en el biogás producido. De acuerdo con la investigación de Huertas-Parrales (2019), los niveles de sulfuro de hidrógeno generados en sistemas anaerobios como el de una PTAR pueden oscilar entre 50 ppm hasta 3000 ppm, dependiendo de la carga orgánica y del contenido de azufre en los lodos. Específicamente en la planta de Ibarra, los monitoreos realizados indican concentraciones de H_2S superiores a los 1000 ppm, lo cual representa un riesgo técnico y ambiental significativo. Estas concentraciones no solo afectan el rendimiento del biogás como fuente energética al reducir su poder calorífico, sino que también provocan corrosión acelerada en motores, tuberías y válvulas metálicas, además de generar olores ofensivos que afectan a comunidades cercanas.

Además, se ha evidenciado que los digestores UASB de la PTAR-I, aunque eficientes en la reducción de carga orgánica, no incorporan mecanismos de microaeración ni fases de purificación post-digestión. Esta omisión impide el control eficiente del H_2S y limita la calidad del biogás, imposibilitando su uso para generación de electricidad o calor. Asimismo, se carece de unidades de tratamiento de lodos que permitan reducir su peligrosidad o valorizar sus nutrientes para uso agrícola.

Propuesta de Optimización Microbiológica

El proceso actual de digestión anaerobia en la PTAR-Ibarra puede mejorarse significativamente a través de una estrategia integral de control de condiciones operativas y reforzamiento de la actividad microbiológica, específicamente de las bacterias metanogénicas responsables de la producción de metano. Basándose en los datos microbiológicos y fisicoquímicos aportados por Alondra Estefanía Méndez, que incluyen concentraciones de metano del 72,60%, pH entre 6.5 y 7.0, temperaturas operativas promedio de 29°C y una carga orgánica específica moderada, se plantea una intervención fundamentada en principios de ingeniería bioquímica aplicada.

Parámetros recomendados:

- **Ajuste del pH:** Mantener el rango óptimo entre 6.8 y 7.2 para maximizar la actividad enzimática de las arqueas metanogénicas.
- **Control de temperatura:** Estabilizar el sistema en un rango mesofílico entre 32°C y 37°C mediante aislamiento térmico o recuperación de calor, considerando que este rango promueve la tasa más alta de conversión de ácidos grasos volátiles en metano.
- **Tiempo de residencia hidráulico (TRH):** Aumento del 15% del TRH para prolongar el tiempo de contacto entre la biomasa y el sustrato, favoreciendo el desarrollo de comunidades microbianas más robustas y resistentes al choque de carga.

La metodología involucra experimentación iterativa con poca escala, donde continuamente se ajusta cada parámetro de forma controlada en pilotos repetidos a pequeña escala, todo ordenado por protocolos de muestreo estadísticamente representativos. Monitorear, análisis de biogás, metano, H₂S, CO₂, pH, temperatura, alcalinidad, concentración de sólidos volátiles. La evaluación de cada ajuste se realizará con base a los indicadores adecuados, tales como la tasa específica de

producción de metano SMPR y la eficiencia de conversión de DQO a biogás que garantizan la replicabilidad del modelo en condiciones operativas reales.

Introducción de Cepas Adicionales:

A fin de incrementar la eficiencia del proceso metanogénico en la PTAR-I, se propone la evaluación e incorporación controlada de cepas metanogénicas altamente eficientes como *Methanosarcina barkeri* y *Methanosaeta concilii*, con ensayos piloto que permitan validar su viabilidad técnica y económica. Las cepas seleccionadas se describen a continuación:

Methanosarcina barkeri: Esta arquea metanogénica exhibe plasticidad en el sustrato de germinación, siendo capaz de usar acetato, hidrógeno y metanol. Es altamente adaptable a fluctuaciones de pH y niveles de aporte orgánico para condiciones variables. La tasa de crecimiento de *M. barkeri* también es relativamente rápida, y se ha informado que la producción de metano aumenta hasta en un 25% en condiciones optimizadas.

Methanosaeta concilii: Esta especie también es queratómictica y acetoclástica. Aunque su tasa de crecimiento es más lenta, su afinidad por el acetato significa que es una arquea eficaz en ambientes donde el acetato es preponderante. Su inclusión favorece la estabilidad del proceso anaerobio a largo plazo. Estudios han indicado un incremento de hasta 15-20% en la producción de metano cuando se encuentra en equilibrio con otras especies metanogénicas (Liu et al., 2018).

La combinación de ambas cepas puede generar un consorcio microbiano más robusto y eficiente, adaptado a distintos perfiles de carga orgánica y condiciones fisicoquímicas. La producción potencial de biogás con la introducción de estas cepas podría incrementarse entre un 30 y 40%, dependiendo de las condiciones específicas del reactor y del régimen de operación. Estas mejoras serán validadas a través de ensayos piloto con seguimiento de parámetros clave como la concentración de metano, velocidad de producción y estabilidad del sistema.

Propuesta Para la Reducción del Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

La PTAR-I presenta una producción mensual de biogás que fluctúa entre los 7.600 y 38.800 m³/mes, con una media anual cercana a los 15.000 m³/mes. Este biogás contiene concentraciones promedio de H₂S de hasta 1200 ppm, valor que representa una carga contaminante de 1,68 g/m³ y compromete su valorización energética. El H₂S es corrosivo para los componentes metálicos de la planta, reduce el poder calorífico del biogás y genera emisiones odoríferas y tóxicas. Por tanto, la instalación de un sistema modular de biofiltración biológica se presenta como una alternativa efectiva, sostenible y de bajo costo para su remoción.

En la PTAR-I se ha evidenciado la presencia de elevadas concentraciones de H₂S en el biogás producido, por lo que se plantea como medida preventiva y correctiva la implementación de un sistema de biofiltración con residuos vegetales, ya que, esta propuesta tiene como objetivo la remoción eficiente de compuestos sulfurados volátiles presentes en el biogás, que afectan negativamente la infraestructura de la planta, la calidad del aire circundante y el biogás generado. La biofiltración constituye una alternativa sostenible, de bajo costo y elevada eficacia, que puede ser adaptada a las condiciones operativas de la PTAR-I.

La biofiltración es un proceso de tratamiento de gases basado en la adsorción física seguida de biodegradación biológica de contaminantes por comunidades microbianas inmovilizadas en un lecho poroso orgánico. En este caso, se propone el uso de bagazo de caña de azúcar y/o vainas de *Moringa oleífera* como medio soporte, materiales que presentan porosidad, capacidad de retención de humedad y nutrientes adecuados para el crecimiento de bacterias sulfooxidantes, especialmente del género *Thiobacillus*. Estas bacterias convierten el H₂S en compuestos no tóxicos, como azufre elemental (S⁰) y sulfatos (SO₄²⁻), mediante procesos de oxidación biológica.

Metodología Propuesta

De acuerdo con datos encontrados, el biogás generado en la PTAR-I contiene concentraciones promedio de $\text{H}_2\text{S} \approx 1200$ ppm. Se estima una producción mensual de biogás de aproximadamente 1.800 m^3 , en función del volumen de lodos tratados ($60\text{--}80 \text{ m}^3/\text{mes}$) y condiciones estándar de digestión anaerobia.

Diseño del biofiltro

Para prevenir los principales problemas identificados en la PTAR-I, como la elevada concentración de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en el biogás y la corrosión acelerada de equipos, los biofiltros deben incorporarse estratégicamente inmediatamente después de los digestores anaerobios tipo UASB, conectados a las campanas de recolección de biogás, y antes de su conducción hacia los gasómetros, equipos de cogeneración o antorchas de quemado. Esta ubicación permite interceptar el biogás crudo en su etapa más contaminada, facilitando la remoción biológica del H_2S mediante el paso controlado del gas a través de medios vegetales activos (como bagazo de caña y/o *Moringa oleifera*), permitiendo que el biogás purificado llegue en condiciones óptimas para su valorización energética o disposición segura, y garantizando así la protección de las instalaciones, la eficiencia del sistema y la salud del entorno laboral y ambiental.

Se propone la instalación de un biofiltro vertical, de flujo ascendente que se fundamenta en las siguientes ecuaciones y relaciones geométricas, obtenidas a partir de modelos aplicados por Littlejohns et al. (2009):

- **Diámetro:** $Dt = Ht \times 0.25 = 0.5 \text{ m}$
- **Altura de trabajo:** $Ht = 2 \text{ m}$

$$Ht = \frac{Dt}{0} \times 0.25 = 2m$$

- **Altura de la columna interna:** $H_d = 0.66 \times H_t = 1.32\text{m}$
- **Volumen de trabajo (V):** 0.3927m^3

$$V = \pi r^2 H_t$$

$$V = \pi(0.25)^2 2$$

$$V = 0.3927\text{m}^3$$

- **Carga superficial estimada (G):** $200 \text{ m}^3 \text{ biogás/día}$
- **Concentración de H₂S:** 1.6716 g/m^3

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = \text{ppm} \times \frac{M_{\text{H}_2\text{S}}}{\text{volumen molar del gas}}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 1200 \times \frac{34.08\text{L/mol}}{24.45\text{g/mol}}$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 1671.6 \text{ mg/m}^3$$

- **Carga estimada de H₂S en biogás (C):** $C = 200 \text{ m}^3 \text{ biogás/día} \times 1.68 \text{ g/m}^3 = 336 \text{ g/día}$
- **Remoción esperada (90%):** $R = 0.9 \times 336 \text{ g/día}$
- **Velocidad de filtración (v):** $1.02\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{200}{\pi(0.25)^2}$$

$$v = \frac{1.02\text{m}^3}{\text{h}}/\text{m}^2$$

Este caudal y velocidad se encuentran dentro de los valores óptimos recomendados para biofiltros biológicos ($1-2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$). El biofiltro actúa en la etapa final del sistema anaerobio, donde

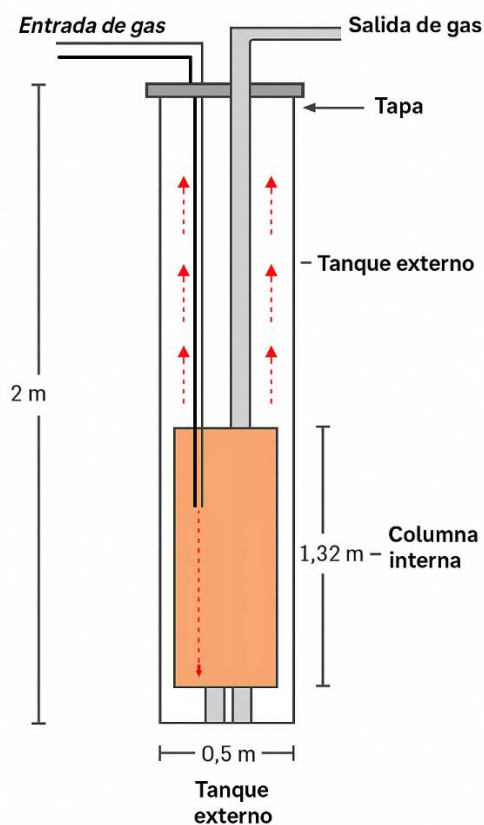
el biogás generado contiene altos niveles de sulfuro de hidrógeno (estimados en 1.68 g/m^3). Este compuesto es altamente corrosivo y tóxico, afecta la infraestructura metálica, disminuye la eficiencia de los motores de cogeneración y genera molestias por olor. Al remover hasta el 90% del H_2S , como se estima en el diseño (336 g/día), se incrementa la calidad del biogás, permitiendo su uso eficiente para generación eléctrica o térmica, reduciendo el impacto ambiental y mejorando las condiciones laborales en la planta.

La remoción biológica de compuestos sulfurados reduce la formación de ácido sulfúrico, previniendo la corrosión de tuberías, válvulas, campanas de digestores y equipos eléctricos, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento correctivo. El biofiltro transforma contaminantes gaseosos en productos no tóxicos como azufre elemental y sulfatos, y puede integrarse en una estrategia de reutilización de residuos agrícolas locales (bagazo, moringa), alineándose con principios de sostenibilidad y economía circular.

El esquema de la figura 12 representa un biofiltro vertical de flujo ascendente tipo airlift, diseñado para la remoción biológica de sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en el biogás generado en sistemas anaerobios como los de la PTAR-I. Este dispositivo consta de un tanque externo de 2 metros de altura, una columna interna o tubo draft de 1.5 metros, y un sistema de flujo inducido por diferencia de presiones. El gas ingresa por la parte superior izquierda del sistema, desciende por el espacio anular entre el tanque y la columna interna, y es forzado a ascender a través del tubo central, donde se encuentra el medio activo cargado con bacterias sulfooxidantes. En esta zona, el H_2S es oxidado biológicamente a compuestos no tóxicos como azufre elemental o sulfato, permitiendo así su purificación antes del uso o almacenamiento del biogás. El sistema incluye una tapa hermética para evitar fugas, un sistema de entrada y salida de gas, y puede complementarse con sensores de gases (H_2S , CH_4 , CO_2) para monitoreo continuo. Este diseño permite un contacto

prolongado y eficiente entre el biogás y el medio biológico, utilizando materiales económicos como PVC, acrílico o polipropileno. Su operación no requiere energía externa adicional, ya que el flujo es generado naturalmente por las diferencias de densidad y presión, lo que lo convierte en una solución viable y sostenible para su instalación en puntos estratégicos del sistema de tratamiento, especialmente después de los digestores anaerobios tipo UASB y antes de los gasómetros o equipos de cogeneración, como parte de un esquema integral de control de emisiones y mejora del biogás en la PTAR-I.

Figura 13. Modelo del biofiltro



Fuente: Elaboración propia

Se propone la instalación de seis biofiltros verticales tipo airlift, diseñados conforme a los cálculos técnicos basados en el volumen de aguas residuales tratadas en la PTAR-I. Estos equipos

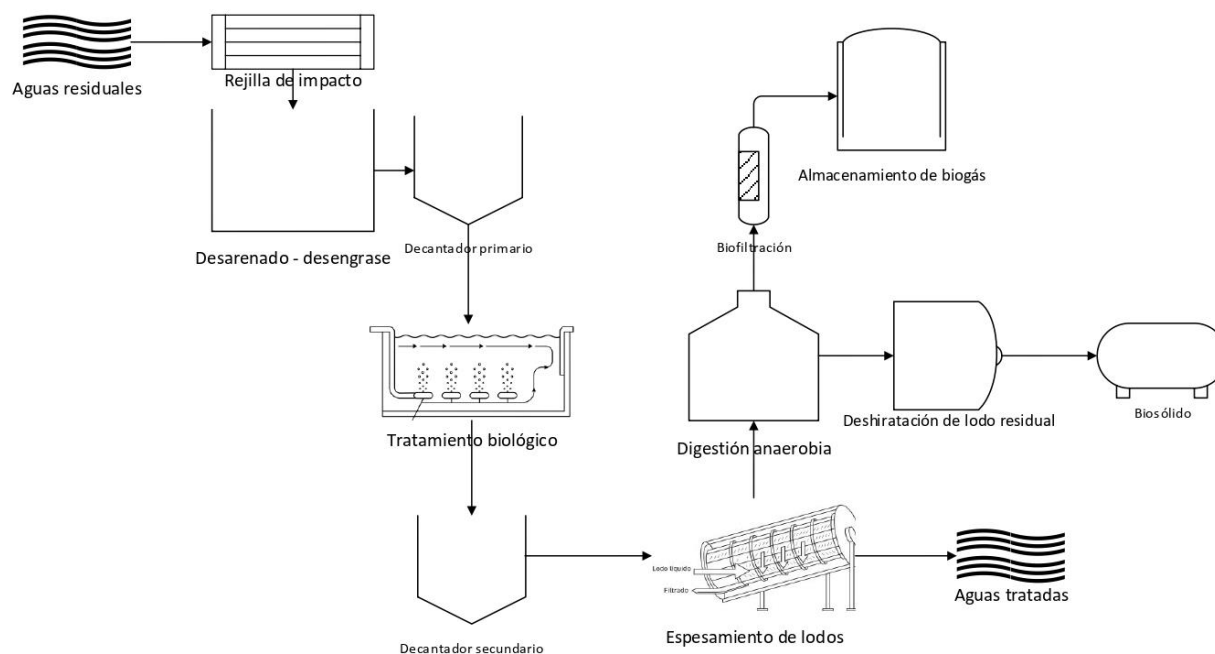
estarán dimensionados para operar eficientemente con el caudal de biogás generado por los digestores anaerobios tipo UASB.

Cada biofiltro será cargado con un medio soporte vegetal compuesto por bagazo de caña triturado y residuos de *Moringa oleifera*, seleccionados por su alta porosidad y capacidad de retención de humedad. Considerando un volumen útil de 0.29 m³ por unidad, se requerirá aproximadamente 43.5 kg de material filtrante por biofiltro, con una densidad aparente de 150 kg/m³. Para mantener condiciones óptimas de actividad microbiana, el sistema incluirá un sistema de riego por aspersión con agua y nutrientes diluidos, manteniendo una humedad relativa entre el 50% y el 70%.

La inoculación microbiana se realizará utilizando un cultivo mixto de bacterias sulfooxidantes del género *Thiobacillus*, aisladas de los lodos activados de la misma planta. El proceso contemplará una fase de aclimatación biológica de 10 a 15 días, durante los cuales el sistema operará con caudales progresivos para favorecer la colonización microbiana del tubo filtrante. Posteriormente, se establecerá un régimen de operación continuo con mantenimiento periódico, incluyendo el recambio del material filtrante cada 6 a 9 meses, según el grado de compactación y la eficiencia de remoción.

La ubicación estratégica de los biofiltros será posterior a los digestores UASB y antes del ingreso a los gasómetros, antorchas o motores de cogeneración, como se muestra en la figura 13. Esta disposición permitirá interceptar el biogás crudo en su fase más contaminada y garantizar su purificación antes del aprovechamiento energético. El sistema se complementará con sensores de monitoreo continuo de H₂S, CH₄ y CO₂, así como con controles automatizados de humedad, lo cual optimiza la eficiencia operativa y garantiza condiciones biológicas estables.

Figura 14. Tratamiento de agua residual con biofiltración



Fuente: Elaboración propia

Se espera una remoción promedio del 90% del H_2S , lo cual equivale a la eliminación de aproximadamente 302 g/día de este gas corrosivo. Esta mejora no solo incrementará la calidad del biogás para su uso energético, sino que también protegerá la infraestructura técnica de la planta, prolongando la vida útil de válvulas, tuberías y motores. Además, como valor agregado, el azufre elemental resultante del proceso de oxidación puede ser reutilizado en aplicaciones agrícolas o industriales.

La propuesta presentada se desarrolla dentro de una perspectiva de economía circular, al utilizar residuos agroindustriales como medios filtrantes, producir subproductos reutilizables y opera un recurso energético actualmente subutilizado. Además, la propuesta se ajusta a las principales recomendaciones técnicas del área, basadas en la FAO, en Cestonaro et al. y en los

análisis ambientales previos de Méndez (2024), de esta manera, la PTAR-I se convierte en caso ejemplificador de innovación ambiental y eficiencia energética para la región.

4.2 Discusión

La producción de biogás a partir de lodos residuales ha emergido como una alternativa estratégica para simultáneamente valorizar los desechos y generar energía sostenible. El procedimiento transforma los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales en una fuente renovable mediante múltiples etapas de tratamiento. La digestión anaerobia, que sigue siendo el mecanismo más utilizado, opera descomponiendo materia orgánica en ausencia de oxígeno y ha sido validada en multitud de plantas a escala industrial (Sánchez M., 2023).

La literatura coincide en señalar que dicho proceso es valorado no solamente por la producción de biogás de característica energética elevada, sino también por la drástica disminución del volumen de lodo estabilizado. Aunque, recientes innovaciones en etapas de pretratamiento han logrado incrementar notablemente el rendimiento volumétrico. Por ejemplo, la investigación de Gurieff et al. (2018) que aplica hidrólisis térmica como pretratamiento desmantela las envolturas celulares, permitiendo una posterior digestión anaerobia más eficiente, al tiempo que mejora la biodegradable.

La reacción térmica, al incrementar la temperatura y la permanencia, favorece la solubilización del carbono orgánico, por lo que se generan mayores flujos de subproductos solubles que alimentan la fase anaerobia. Como resultado, la producción de biogás se incrementa y el tiempo de retención se reduce, lo que optimiza la utilización del volumen del digestor. Esta estrategia se distingue por su alta capacidad para solubilizar lodos residuales con elevada carga de materia orgánica particulada, y el módulo experimental empleado ha sido validado en múltiples plantas piloto a escala real.

El procedimiento al que se hace referencia implica exponer los lodos a condiciones elevadas de temperatura y presión, lo que provoca la cizura de las membranas celulares y la liberación de fracciones orgánicas solubles. Esta fracción solubilizada se encuentra después de ser utilizada por las bacterias metanogénicas de manera que se acelera la digestión anaerobia (Guananga et al., 2024). La ventaja principal que se extrae de la hidrólisis térmica es el aumento notable de sustratos solubles, canalizando a su vez un incremento apreciable en la producción acumulativa de biogás.

No obstante, se hace imprescindible sopesar el consumo energético inherente a los ciclos térmicos presurizados y a las presiones elevadas, así como la eventual carga ambiental, que se manifiesta en la aparición de metabolitos secundarios no deseados cuando el tratamiento y la eliminación de estos no se conducen de manera controlada.

Por su parte, López et al. (2021) proponen un marco de tratamiento integrado mediante la superposición de tres pretratamientos: térmico, electroquímico y un procedimiento de bioaumentación, los que se aplican en secuencia antes de la digestión anaerobia. La unión de las tecnologías tiene como meta desgastar las estructuras moleculares complejas, lo que, en última instancia, optimiza el rendimiento en términos de producción de biogás. El componente térmico se dirige a la solubilización de los sólidos, el electroquímico a la fragmentación de las membranas celulares, y la bioaumentación al incremento poblacional de especies microbianas que son favorables, configurando así un enfoque sistémico que busca el máximo rendimiento operativo.

La adopción de métodos de vanguardia subraya la trascendencia de optimizar la digestión anaerobia, al tiempo que se persigue una producción de biogás que sea no solo más eficiente, sino también sostenible. La integración de estrategias electroquímicas en el tratamiento de lodos se erige como una aportación notable en la generación de biogás. Al someter la matriz a una corriente

controlada, abordajes como la electrocoagulación y la electrooxidación inducen la oxidación de la biomasa y producen especies reactivas cuya presencia favorece los pasos de hidrólisis y acidogénesis.

Mientras la electrocoagulación aglutina y concentra las partículas, mejorando la floculación y la aclaración de los lodos, la electrooxidación, encomendándose a la ruptura de estructuras orgánicas densas, las transforma en compuestos más ionizados (Alcazar, 2023). La evidencia operativa sostiene que esta doble vía electroquímica no solo potencia la biodisponibilidad de la biomasa, sino que también incrementa el rendimiento de biogás. Sin embargo, el verdadero reto consiste en la racionalización del consumo específico de energía eléctrica y en el control de la producción de subproductos, cuya naturaleza tóxica puede alterar la actividad microbiana, poniéndose de relieve en la posterior digestión anaerobia.

Complementariamente, la bioaugmentación, abordaje biotecnológico en el que se inoculan comunidades microbianas seleccionadas, se ha instituido como una vía adicional para la erosión selectiva de contaminantes recalcitrantes, también facilitando el avance cinético en la producción de biogás. Este enfoque resulta singularmente eficaz cuando el lodo presenta compuestos orgánicos de difícil biodegradación natural. En este contexto, las comunidades de bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas son las más frecuentemente seleccionadas, dado el rol determinante que desempeñan en las sucesivas fases de conversión de los ciclos de digerido anaeróbico (Gállego, 2021).

La inoculación de tales consorcios bacterianos afinados permite que la ruptura de la carga orgánica se produzca en tiempos menores y que la acumulación de metano se torne más eficiente. Con todo, el impacto de la bioaugmentación se sujeta a condicionantes tales como: la aceptación y funcionalidad de los microorganismos exógenos en el colchón microbiano nativo y a las

condiciones tecnológico-operativas fijadas en la digestión, por lo que la realización de un diagnóstico exhaustivo del biocodo microbiano se vuelve un prerrequisito para el éxito, tal como arguye Martínez (2021).

La divergencia en la elaboración de los lodos origina, a su vez, variaciones que inciden tanto en la cinética digestiva como en la calidad del biogás obtenido. Cuando la source se compone de aguas residuales municipales, industriales o agrícolas, los lodos asociados manifiestan perfiles distintos en: sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno (DQO), pH y naturaleza nutricional, lo que se traduce en variaciones en el rendimiento posible de biogás (Villar, 2023).

La magnitud y la proporción de los sólidos totales y volátiles se reconocen, por tanto, como los determinantes más relevantes en la cuantificación de la carga orgánica susceptible de conversión anaeróbica, establecido en el recuento tanto de la estabilidad del bioproceso como del rendimiento de metano. Un aumento en la concentración de sólidos volátiles suele correlacionarse con un mayor potencial de producción de biogás, dado que indica una mayor fracción de sustrato orgánico biogestionable. La demanda química de oxígeno (DQO) representa, asimismo, un indicador crítico, ya que cuantifica la masa de materia orgánica susceptible de ser mineralizada, permitiendo evaluar el potencial energético de los lodos.

El pH se comporta como parámetro regulador del hábitat microbiano; su mantenimiento dentro de un rango óptimo se traduce en la maximización de la actividad de los microorganismos anaerobios. A su vez, los nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo son requeridos para la proliferación y función metabólica, aunque su exceso puede inducir un efecto inhibitorio en la digestión (Parra y Zambrano, 2021). El rendimiento de biogás, así como su temperatura de metano, se hallan condicionados por la composición del lodo, las variables operativas del reactor y la estrategia de tratamiento adoptada. Referencialmente, un número significativo de investigaciones

ha documentado producciones elevadas de metano, avalando el aprovechamiento de esta ruta como tecnología de energía renovable. El metano, como fracción mayoritaria del biogás, es el determinante clave que incide en el valor energético del producto final.

La integración de múltiples procedimientos de pretratamiento se postula como estrategia capaz de incrementar de manera sinérgica la producción de biogás, brindando, por lo tanto, ventajas operativas y económicas apreciables. Como se argumenta en Gurieff et al. (2018), la sinergia entre hidrólisis térmica y bioaumentación permite maximizar, por un lado, la solubilización de la materia orgánica y, por otro, la población activa de microorganismos. Una estrategia análoga, en la que se combinan tratamientos electroquímicos y bioaumentación, presenta el potencial de minimizar la persistencia de compuestos recalcitrantes y aumentar la producción de metano, proporcionando una tasa de digestión más acelerada. Aunque cada técnica presenta ventajas características, la efectividad de cada una está condicionada por la naturaleza específica de los lodos, por lo que resulta crítico proponer un esquema de pretratamiento que se ajuste en cada caso a la composición del material y a los parámetros establecidos del digestor anaerobio, para así maximizar el biogás generado a lo largo del proceso.

La composición de los lodos actúa como un parámetro directivo en la producción metanogénica. En términos generales, los lodos que exhiben una elevada carga de materia orgánica, en particular aquellos cuyo perfil se encuentra dominado por carbohidratos y lípidos, son más propicios a la generación de metano. La hidrólisis que ejecutan las bacterias es capaz de transformar los carbohidratos en monómeros solubles, que, de forma sucesiva, son metabolizados en ácidos grasos volátiles (AGVs) y, eventualmente, en biogás. Aunque los lípidos poseen un proceso de descomposición más complejo, su contenido calórico superior conduce a una mayor producción potencial de energía en forma de metano.

Contrariamente, los lodos con elevado porcentaje proteico tienden a constituir un desafío, dado que su deterioro libera amonio, un agente que puede inhibir a las arqueas metanogénicas (Alania e Inga, 2022). Para mitigar dicho riesgo, resulta crucial realizar una adecuada selección y caracterización de los lodos a utilizar, de modo que se puedan prever y ajustar los niveles de producción metanogénica con el fin de maximizar el rendimiento del sistema. Asimismo, la disponibilidad de nutrientes clave, especialmente nitrógeno y fósforo es igualmente determinante, dado que son requeridos para el mantenimiento y actividad de la consorcio microbiana, aunque concentraciones excesivas puedan inducir efectos negativos.

En el ámbito de la operación del reactor, factores tales como la temperatura, el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la carga orgánica se perfilan como determinantes de la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. Temperaturas óptimas, que se sitúan de forma habitual en el espectro mesofílico (35 a 40 °C) o en el termofílico (50 a 60 °C), aseguran el máximo desempeño de los grupos microbianos. Paralelamente, el TRH debe extenderse lo suficiente como para que la biomasa orgánica alcance un estado de digestión completo, mientras que la carga orgánica se ha de equilibrar para prevenir la inhibición del proceso. La regulación precisa de estas variables se halla en el fundamento de la maximización del volumen y la calidad del biogás producido, lo que subraya la relevancia de un diseño y una operación metódicos del reactor como factores clave del éxito del proceso (Criollo y Rodríguez, 2022).

El pH del medio también condiciona la producción de biogás, con un intervalo óptimo entre 6.5 y 7.5, dentro del cual las arqueas metanogénicas logran graduar la actividad y, en consecuencia, transformar con eficacia los ácidos grasos volátiles en metano. Fuera del intervalo óptimo de pH, la actividad microbiana se ve seriamente comprometida, evidencia que respalda el trabajo de

Llumiyinga (2018), que observa ausencia de producción de biogás a pH 8, donde se inhibieron los microorganismos debido a la posible formación de amoníaco.

Por su parte, la investigación de Manobanda y Valdez (2020) muestra que, a pH 4.5, la producción se limita a 6.28 cc de biogás, indicando que un entorno ácido provoca acumulación de ácidos orgánicos, acidificación del medio e inhibición de la metanogénesis. Se concluye que el control del pH es crucial para equilibrar la comunidad microbiana y, en consecuencia, para estabilizar el proceso de digestión anaerobia. Este equilibrio se logra mediante la adición de alcalinizantes o ácidos en dosis moderadas y la ejecución de un monitoreo continuo que previene pérdidas de estabilidad. La intervención de inhibidores en un reactor anaerobio provoca alteraciones que, a su vez, afectan la producción del biocombustible.

Compuestos como el ion amonio, metales pesados, fenoles y antibióticos son reconocidos por su capacidad de limitar la actividad de las bacterias metanogénicas. El ion amonio, frecuentemente acumulado en digestores que reciben sustratos con elevado contenido proteico, se convierte a amoníaco libre a pH altos, condición tóxica para estos microorganismos. Metales pesados, a concentraciones elevadas, interfieren con procesos enzimáticos críticos en las vías de metanogénesis. Fenoles y antibióticos, que se encuentran en lodos industriales, modifican el equilibrio microbiano y disminuyen la eficiencia energética del digestor. Para contrarrestar estos efectos, es imperativo aplicar tratamientos previos que disminuyan la carga de compuestos inhibitorios, controlar rigurosamente las condiciones operativas y optar por comunidades microbianas con capacidad de tolerar inhibidores. La selección de cepas resistentes ha demostrado, en ensayos recientes, incrementar la estabilidad operativa y la recuperación del biodigestor ante picos de contaminación (Devia y Yate, 2022).

Entre las ventajas ambientales asociadas a la digestión de lodos residuales, la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero es el efecto más documentado. Todos los estudios analizados confirman que el proceso de digestión anaerobia, al capturar y valorizar el metano que de otro modo sería liberado directamente a la atmósfera, contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático a escala global. La digestión anaerobia no se limita a capturar el metano que de otro modo se emitiría de los lodos no tratados: el proceso transforma este gas en una fuente útil de energía, lo que, a su vez, potencia los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

Las reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero se complementan con la creación de energía renovable, un elemento clave en la transición hacia economías de bajo carbono. El biogás generado puede emplearse directamente como combustible, o ser convertido en electricidad y calor, supliendo de este modo una alternativa sostenible y renovable que sustituye progresivamente a los combustibles fósiles. El aprovechamiento de esta fuente de energía limpia rebaja a su vez la dependencia de recursos no renovables y refuerza la seguridad energética de las comunidades.

Asimismo, la digestión anaerobia genera beneficios ecosistémicos adicionales mediante la reducción de la contaminación del agua y del suelo. Al estabilizar los lodos, el proceso aminora la carga de patógenos y la cantidad de materia orgánica que, de ser dispuesta incorrectamente, podría contaminar los cuerpos de agua (Muñoz et al., 2020). Adicionalmente, el digestato resultante del tratamiento anaerobio se presenta como un fertilizante orgánico de alto valor, cerrando el ciclo de nutrientes y facilitando una gestión de residuos sostenible.

Se manifiesta en este contexto el paradigma de la economía circular, donde los flujos residuales se transforman en recursos de alto valor, favoreciendo la pervivencia y rentabilidad

interna del sistema. Esta transición, sin embargo, exige una evaluación exhaustiva de los efectos ambientales y económicos derivados de los procesos de pretratamiento. La hidrólisis térmica y las estrategias electroquímicas, pese a potenciar de manera notable el rendimiento en biogás, generan una demanda energética elevada y pueden inducir efectos nocivos sobre el entorno (Sánchez O., 2016). Asimismo, la bioaumentación y el tratamiento químico requieren de una gestión atinada de bioprocesos y reactivos para preservar la eficiencia digestiva y salvaguardar el equilibrio ecológico. La elección del método debe, por ende, articular la maximización del producto biogás, la rentabilidad y la minimización del riesgo ambiental.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La producción de biogás a partir de lodos residuales se destaca como una tecnología prometedora que ofrece una solución sostenible para la gestión de residuos y la generación de energía renovable. Este proceso no solo ayuda a reducir el volumen de lodos, sino que también convierte los residuos en una fuente valiosa de energía limpia.

Los estudios revisados evidencian que la combinación de múltiples técnicas de pretratamiento, como el uso de la hidrólisis térmica junto con la bioaumentación y los métodos electroquímicos, puede mejorar significativamente la eficiencia de la digestión anaerobia. Este enfoque integrado permite una descomposición más completa de la materia orgánica y una mayor producción de biogás, haciendo que el proceso sea más rentable y sostenible. Además, la optimización de parámetros operativos, como la temperatura, el pH y el tiempo de retención, es crucial para asegurar el máximo rendimiento del sistema y la estabilidad microbiana.

La implementación de estas tecnologías no solo aporta beneficios económicos y energéticos, sino que también contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la estabilización de los lodos residuales. Al convertir los residuos en recursos, se fomenta la transición hacia una economía circular y se promueve la seguridad energética al tiempo que se mitiga el cambio climático.

La producción de biogás a partir de lodos residuales representa una solución efectiva para abordar los desafíos ambientales y energéticos actuales, siempre y cuando se realicen ajustes operativos adecuados para maximizar el rendimiento del proceso.

Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios adicionales para identificar la combinación óptima de pretratamientos que maximice la producción de biogás. La integración de técnicas como la hidrólisis térmica, la bioaumentación y el tratamiento electroquímico debe adaptarse a las características específicas de los lodos, asegurando que el sistema opere en las condiciones más eficientes. Los experimentos a escala de laboratorio pueden ayudar a determinar la combinación más efectiva antes de implementar a gran escala.

Implementar sistemas de monitoreo continuo para controlar parámetros críticos como la temperatura, el pH, el TRH y la concentración de inhibidores es esencial para mantener la estabilidad del proceso y optimizar la producción de biogás. La automatización del control de estos parámetros puede mejorar significativamente la eficiencia operativa, permitiendo ajustes en tiempo real y reduciendo el riesgo de fallos en el sistema.

Antes de implementar tecnologías de pretratamiento a gran escala, es fundamental realizar evaluaciones de impacto ambiental que consideren tanto los beneficios como los posibles riesgos asociados con el uso de energía y la generación de subproductos. Promover prácticas sostenibles y seleccionar tecnologías que minimicen el impacto ambiental mientras maximicen la producción de biogás contribuirá a una implementación más responsable y exitosa de estas soluciones.

Bibliografía

- Accostupa, P. M., Quillahuaman, W., & Arangoitia, V. M. (2019). Propuesta y evaluación de la influencia de las aguas pluviales en la red colectora de las aguas residuales en el trayecto. *Universidad Andina del Cusco*, 1(1), 10-30.
- Alania, J. G., & Inga, E. P. (2022). Efecto de la aplicación de biosólidos como enmienda sobre suelos agrícolas erosionados y su rendimiento en el cultivo de *Raphanus Sativus* (rabanito), en Carapongo-Lurigancho. *Repositorio de la Universidad Peruana Unión*, 1, 73-86.
- Alcazar, M. (2023). Innovación en el tratamiento y revalorización de efluentes de curtiembres por bioconversión microbiana . *Universidad Nacional Mayor de San Marcos* , 1(1), 45-79.
- Arias, M. F. (2020). Bioindicadores de contaminación en aguas residuales de sistemas agropecuarios en el Distrito de Riego Arenal Tempisque, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Científica Oriolus* , 1, 1-13.
- Ayala, S. M., Milla, D. M., & Montero, D. N. (2022). Higienización de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Manchay, y su uso como insumo de cultivo en el año 2021. *Repositorio Institucional Continental*, 1, 50-86.
- Barrera, E. L., Odales, L., Carabeo, A., Alba, Y., & Hermida, F. O. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 40(2), 303-321.
- Carcasi, J. R., & Vilchez, A. J. (2022). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de agua como agregado fino para la producción de concreto en la

- provincia de Mala, Cañete. *Repositorio institucional de la Universidad Ricardo Palma*, 1, 89-114.
- Cárdenas, G. (2022). Alternatives to Treat Sludge from Sewage Treatment Plants: A Review. *ScieElo*, 27(3), 1-22.
- Carrera, J., & Suárez, M. E. (2019). Aguas residuales industriales en Iberoamérica. *CYTED*, 1(1), 123-148.
- Cestonaro, A., Radi, R. L., & Kunz, A. (2019). Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. *Os biodigestores*(3), 1-28.
- Chipana, J. V. (2022). CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) LA ESCALERILLA, PARA SU REAPROVECHAMIENTO EN LA AGRICULTURA. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA*, 11-16.
- Criollo, S., & Rodríguez, E. (2022). Diseño teórico de una planta de producción de biogás a partir de residuos de naranja en la ciudad de Bogotá. *Fundación Universidad de América*, 1(1), 73-84.
- Devia, N. T., & Yate, M. C. (2022). Análisis de la disposición final para el aprovechamiento de lodos en la planta de asfalto de la empresa Mavi Pavimentaciones S.A.S en el municipio del Carmen de Apicalá, identificando una alterenativa de implementación. *Re-Piloto*, 1, 36-45.
- EMAPA. (2018). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales con ingreso del 90% de caudal. *La Hora*.

- Espinosa, K. G. (2021). Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: Análisis del potencial de la ciudad de Quito. *Universidad Andina Simón Bolívar*, 1(1), 61-68.
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los bioreactores. *Colección Documentos Técnicos. Buenos Aires*, 1(12), 3-13.
- Fuentes, N., Isenia, S. A., & Ascencio, J. g. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 13-25.
- Gállego, A. K. (2021). Efecto de la bioaumentación en la generación de metano en un proceso de digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos. *Instituto Politécnico Nacional*, 1(1), 45-89.
- García, A. (2021). Co-Digestión anaeróbica de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales para producir biogás. Revisión sistemática, 2021. *Repositorio Digital de la Universidad César Vallejo*, 1, 34-69.
- García, O. F., & Mora, C. R. (2020). Estudio de prefactibilidad para el empleo de dos agentes químicos y uno natural utilizados para el tratamiento de lodos producidos en las plantas de tratamiento de agua residual industrial. *Ciencia Unisalle*, 30-52.
- Giraldo, E. A., & Lozada, D. L. (2019). Origen de los olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. *Repositorio Digital de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito*, 1, 45-50.
- González, G., & Rodríguez, Y. (2022). PRODUCCIÓN INTEGRADA DE ALIMENTOS Y ENERGÍA A ESCALA LOCAL. *13er Congreso Internacional de Educación Superior*, 1-10.
- Gonzalez, K. (2023). Simulación de residuos orgánicos derivados del café para la producción de biogás por medio de Aspen Plus. *EAN Universidad*, 1, 23-34.

- Grajeda, C. M., & Pocasangre, A. (2019). Determinación de impactos ambientales en planta de tratamiento de aguas residuales mediante análisis de ciclo de vida ambiental-ACV. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), 80-90.
- Guananga, N. I., Guevara, L. E., González, M. V., & Freytez, E. (2024). Procesos biológicos aplicados a las aguas residuales. *s Editorial Grupo Compás*, 1(1), 63-69.
- Guananga, N. I., Iñiguez, L. E., Cabrera, M. V., & Freytez, E. (2024). PROCESOS BIOLÓGICOS APLICADOS A LAS AGUAS RESIDUALES. *Editorial Grupo Compás*, 1, 62-93.
- Hidalgo, D., Sanz, S., Marroquin, J., Castro, J., & Antolín, G. (2020). Influencia de las condiciones de operación en el refino de biogás para producir biometano mediante contactores de membrana. *EBSCO*, 9(5), 388.
- Martinez, M. (2023). Beneficios de Lodos Residuales: Aprovechando Recursos y Cuidando el Medio Ambiente. *Orozco Lab*, 1(1).
- Martínez, M. R. (2021). Estudio y manejo de comunidades microbianas de lodos de alpechín en balsas de evaporación para su biorremediación y aprovechamiento. *Universidad de Almería*, 1(1), 81-93.
- Medina, M. d., Negrete, M. d., Gámez, F. P., Álvarez, D., & Conde, E. (2020). LA APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES AFECTA, A CORTO PLAZO, LA BIOMASA MICROBIANA Y SU ACTIVIDAD EN SUELOS SÓDICOS. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 36(3), 577-591.
- Méndez, A. E. (2024). Propuesta de manejo de lodos residuales generados en la planta de tratamiento de la ciudad de Ibarra. *PUCE*, 16-24.

- Miranda, E. I. (2022). OPERACIÓN Y REDISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR EXPERIMENTAL. *Ciencia Sur*, 7(9), 61-74.
- Mojica, C., Pintor, D. A., Becerra, E. V., & Medina, A. H. (2021). Estudio comparativo de biofermentos no enriquecidos y enriquecidos, obtenidos en digestores tipo batch y semi-continuos. *Dinalet*, 7(2), 40-53.
- Muñoz, M. B., Contreras, A. M., Santos, R. F., Regla, E. R., & Cárdenas, T. M. (2020). Resultados del procedimiento de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en Ecuador. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 3(6), 1-10.
- Muñoz, M. B., Santos, R. F., Contreras, A. M., Regla, E. R., & Cárdenas, T. (2020). Análisis del proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos de Manta, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria SAPIENTIAE*, 3(6), 65-83.
- Nicho, O. J., Namay, L., Chimoy, J. G., & Cárdenas, A. G. (2021). Metanogénesis y biodigestores. *Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrion*, 1(1), 1-16.
- Osorio, M. A., Carrillo, W. E., Negrete, J. H., Loor, X. A., & Riera, E. J. (2021). The quality of domestic waste water. *Polo del conocimiento*, 6(3), 228-245.
- Pagea, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., & Mulrow, C. D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 700-790.
- Palacios, A. C. (2021). Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal Portoviejo. *ESPE*, 24-32.

- Parra, D. L., Botero, M. A., & Botero, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149-16.
- Parra, W., & Zambrano, R. (2021). Evaluación del potencial de producción de biogás de las aguas residuales de una planta porcina mediante digestión anaerobia. *Universidad Agraria del Ecuador*, 1(1), 46-74.
- Paucar, F., & Iturregui, P. (2020). The challenges of wastewater reuse in Peru. *South Sustainability*, 1(1), 1-11.
- Pérez, B. J., & Alvarado, C. A. (2023). Análisis de características generales a partir de un prototipo de biodigestor discontinuo. *UNITEC*, 1, 32-34.
- Pinargote, S. R., & Vergara, G. A. (2020). Diseño de un biodigestor anaeróbico para generación de biogás utilizando aguas residuales de la producción de café. *Digital Space SPOL*, 32-45.
- Quinchía, Y. A., Pérez, J., Doria, G. M., & Sánchez, Y. (2019). Parámetros de calidad de producción de biogás a partir de pulpa de café. *Agricolae Habitat*, 2(1), 11-29.
- Ramírez, T., Medrano, O., & Escobedo, L. (2020). Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El caso de la PTAR noreste, Villahermosa, México. *enerLAC olade*, 12-30.
- Ramos, C. C. (2022). Evaluación de la generación de gases subproducto (H₂S) de sustratos orgánicos en procesos de biodigestión anaerobia a escala laboratorio. *Universidad Santo Tomas*, 1, 29-32.
- Ramos, E., Carranza, G., & Gómez, P. (2021). Estudio de la simulación hidrodinámica de un biodigestor doméstico de tipo tubular. *Revista RedBioLAC*, 5(1), 41-47.

- Ribera, T. (2021). Los Lodos Residuales. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*.
- Rodríguez, A. (2019). Producción de biogás a partir de residuos generados en el sector hotelero para su autoabastecimiento desde el punto de vista energético. *Universidad de la Laguna*.
- Rodríguez, L. (2022). Análisis de la generación energética a partir del biogás obtenido en la planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre (Bogotá). *Universidad de Barcelona - España*, 12-24.
- Sánchez, M. M. (2023). Absorción química de CO₂ para la obtención de una corriente de metano, procedente del biogás generado en el proceso de digestión anaerobia de una depuradora de aguas residuales urbanas. *Universidad de Granada*, 1(1), 15-26.
- Sánchez, O. (2016). Viabilidad de la utilización del biogás para generación de energía eléctrica como autoconsumo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Juticalpa, Olancho. *UNITEC*, 74-93.
- Sierra, E., Díaz, J., Cifuentes, G. R., Villalobos, J. É., Lara, C. R., Silva, J. A., . . . Pompeo, R. P. (2020). Lodos y biosólidos de tratamiento de aguas y aguas residuales. *Universidad de Byacá*, 1, 75-99.
- Spahr, D. A., Carrizo, J. F., Patiño, M. B., & Rubiolo, G. S. (20219). Relevamiento, evaluación y optimización de biodigestores. *La referencia*, 1, 37-54.
- Suárez, V. D., López, I., & Álvarez, M. (2018). ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PROCESOS. *Revista Centro Azucar*, 46(1), 73-86.

- Tenemaza, H. F., Loor, W. A., & Guerrero, M. S. (2024). Planta de tratamiento de aguas residuales (ptar): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado en la ptar el Tambo. *Journal Scientific MQRInvestigar*, 8(2), 918-932.
- Univision. (2028). Humphry Davy: el gran científico del siglo XIX que descubrió varios elementos químicos y la cura para la resaca. *Ciencia y tecnología univision*.
- Villar, C. J. (2023). Analysis of the feasibility and benefits for the use of biological sludge from WWTPs in the production of biogas: A case study for its possible implementation in a biogas production: Case study for its possible implementation in a Wastewater Treatment Pla. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1(1), 21-37.
- Zabotto, A. R., Zuñiga, E. A., Ruiz, L. M., Broetto, F., Tavare, A. R., & Kanashiro, S. (2029). Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto - diagnóstico de investigación. *Research Diagnosis Idesia*, 37(2), 103-108.
- Zarza, L. F. (2024). ¿Qué son las aguas residuales? *iAgua*, 1(1), 44-54.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz PRISMA

Autor(es)	Año	Título	Método de obtención de biogás	Características del lodo	Características del biogás	Impacto ambiental
Gurieff, Højsgaard, Nielsen & Rodrigo	2018	Optimización de la eficiencia energética y producción de biogás	Hidrólisis térmica EXELYST™ a 165 °C, 9 bar, <30 min	24% ST, 31% SV, DQO entrada: 1458 g/kg, salida: 410 g/kg	290 Nm ³ de biogás, +20% rendimiento, 33% destrucción de sólidos	Eficiente y rentable; menor uso de vapor; reducción de costes de eliminación
Ramírez, Deago & Flores Tejedor	2020	Anaerobic digestivity of wastewater biosolids using the Oxitop system to estimate biogas production	Digestión anaerobia con sistema OxiTop	DQO promedio 924 mg/L; pH: avícola 5,8, hotelera 6,9, comercial 7,4	Biogás avícola: 10,6 mL CH ₄ /g SV; comercial: 41,56 mL CH ₄ /g SV; hotelera: 9,6 mL CH ₄ /g SV	Reducción de SV, grasas y sustancias surfactantes; mejora de la relación C/N
Domínguez-Araujo et al.	2023	Quality of by-product derived from a biodigester fed with two organic loads of pig waste	Digestor continuo 6 m ³ a 24 °C	C/N 9,52%; MO 53,98 kg; C total 31,32; N 3,4; P 4,01	CH ₄ : 61,68 mL/kg; eficiencia 40%	Mitigación de GEI; aprovechamiento de residuos porcinos
Valverde Calderón	2019	Implementación de un sistema de tratamiento anaerobio de lodos en PTAR La Enlozada (Arequipa)	Biodigestión anaerobia a 35 °C	Carga: 2,60 kg SSV/m ³ d	Producción de biogás 65%	Genera energía renovable; reducción de patógenos y olores; ingreso económico por lodo digerido
López Vargas et al.	2021	Solubilidad, biodegradabilidad y capacidad de producción de metano de lodos residuales pretratados	Prehidrólisis térmica (90 °C, 90 min), electrooxidación (400 mA, 45 min), bioaumentación con bacterias	Solubilización: 34,7%, 28,4% y 0,9% (PT, PEO, PB)	Eficiencia CH ₄ : 61,7%, 16,1% y 2,3% según técnica	Reducción de DQO y SV; menor contaminación; alternativa viable de bajo químico
Rodríguez Cortés	2023	Análisis de la generación energética a partir del biogás en PTAR El Salitre (Bogotá)	Digestión anaerobia a 35 °C	Grasas 97,03 kg; arenas 7,37 kg; residuos 2,21 kg; pH 6,77-6,9	Producción 33.000 m ³ /día; poder calorífico 22.400 kJ/m ³	Ahorro del 50% de energía en PTAR; reducción de GEI
Llumiquirenga Suntaxi	2018	Evaluación de la eficiencia de producción de biogás a partir de lodos y grasas (TECOPECA)	Codigestión anaerobia a 37 °C	177,76 m ³ fango/día; ST 27,4 g/kg; SV 13,96 g/kg; pH 8,49; DQO 2479 mg/L	1001,69 mL/g biogás (94% lodo + 6% grasa)	Fuente alternativa de energía renovable; valorización de residuos

Sánchez Varela	2016	Viabilidad de uso de biogás para autoconsumo energético en PTAR Jutucalpa (Olancho)	Digestión anaerobia 23–29 °C	Carga orgánica 6198,46 kg/día; DQO promedio 643 mg/L	60% metano (1806,74 Nm ³ /día); potencia 0,46 MWt y 161 kW	Reducción de CO ₂ (6735,6 kg/año); energía limpia para autoconsumo
González Gusmán	2023	Análisis de viabilidad de aprovechamiento de lodos biológicos en PTAR Funza	Digestión anaerobia a 18,9 °C	ST 85,5%; SV 59–88%; N 4%; P 8,12%; MO 22,4%; pH 5,53	1045 m ³ /h biogás; 35% aprovechado para calentar lodos; 68% energía eléctrica	Economía circular; reducción de contaminantes y organismos nocivos
Manobanda Toapanta	2020	Obtención de biogás a partir de mezclas de agua residual y residuos orgánicos biodegradables (Ganadería San Luis y mercado DMQ)	Digestión anaerobia 30–40 °C	Mezcla: 0,70 kg residuos, 0,17 kg agua residual, 0,93 kg estiércol; pH 4,7	Biogás: 6,28 cc (M1), 103,62 cc (M2), 4,14 cc (M3)	Aprovechamiento energético potencial; valorización de residuos

Fuente: elaboración propia

Anexo 2. Resumen de la propuesta

Categoría	Descripción
Antecedentes de la PTAR-I	La PTAR-I de Ibarra cuenta con digestores anaerobios que actualmente producen biogás, pero en volúmenes limitados y con alta presencia de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S). El biogás generado presenta bajo poder calorífico, lo que limita su aprovechamiento en procesos energéticos internos de la planta. - El análisis de la revisión bibliográfica evidenció que la mayoría de plantas similares enfrentan problemas comunes: baja concentración de CH ₄ , exceso de humedad y compuestos corrosivos en el biogás.
Problemáticas identificadas	Corrosión acelerada en equipos y tuberías debido a altas concentraciones de H ₂ S. Olores desagradables que generan molestias en el entorno inmediato. Dificultad de aprovechar el biogás para cogeneración energética debido a su baja calidad.
Propuesta tecnológica	Implementación de un biofiltro de lecho empacado en la línea de salida del biogás. Este sistema utiliza un medio poroso colonizado por microorganismos capaces de oxidar biológicamente el H ₂ S, además de reducir humedad e impurezas, logrando un biogás más limpio y de mayor calidad energética. Reducción estimada del H ₂ S en un 80–90%, lo que mejora la calidad del biogás y reduce la corrosión.
Resultados obtenidos en la propuesta	Incremento proyectado en la concentración de CH ₄ hasta un 65–70%, con mayor poder calorífico (22.000–24.000 kJ/m ³). Viabilidad de utilizar el biogás en motores para cogeneración eléctrica y térmica, generando un ahorro de hasta el 40–50% en consumo energético interno de la planta. Disminución significativa de emisiones de gases ácidos y olores ofensivos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental de la PTAR-I.
Colaboración de antecedentes con la propuesta	La situación actual de la PTAR-I caracterizada por baja calidad del biogás y altos niveles de H ₂ S fundamenta la necesidad de implementar un sistema de purificación. Estos antecedentes validan que la propuesta del biofiltro no es un cambio estructural, sino una optimización tecnológica que se integra al proceso existente, corrigiendo sus limitaciones y maximizando el aprovechamiento energético del biogás.
Beneficios esperados	Ambientales: mitigación de olores y emisiones de H ₂ S. Energéticos: biogás más limpio y con mayor eficiencia de combustión.

Económicos: prolongación de la vida útil de los equipos, reducción de costos de mantenimiento y ahorro en energía.

Sociales: contribución a la economía circular y fortalecimiento de la imagen de la PTAR-I como modelo de gestión sostenible.

Fuente: elaboración propia