



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster Universitario en Energías Renovables

**DISEÑO DE UN DIGESTOR ANAERÓBICO
PARA EL APROVECHAMIENTO DE LODOS Y
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA PTAR
SALITRE DE BOGOTÁ, COLOMBIA**

Trabajo fin de estudio presentado por:	Francia Victoria Morales Bonis
Tipo de trabajo:	Tesis de grado
Línea/as de trabajo:	Energía Biomasa
Director/a:	Rebeca Sánchez Vásquez
Fecha:	06/02/2024

Resumen

En el presente estudio, se llevó a cabo el diseño de un digestor anaerobio para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre, cuyo funcionamiento se centra en el tratamiento de aguas residuales provenientes de alrededor de 3.2 millones de habitantes de una zona urbana y diversas industrias. Lo anterior permitió principalmente: I. Consolidar los requisitos del diseño con datos relevantes como la ubicación de la infraestructura, la alimentación del digestor de 419mil lb/día, tiempo de retención hidráulica mayor a 20 días y pH entre 7 y 8, II. Identificar la metodología necesaria para el dimensionamiento de la estructura del digestor, gracias a la guía de diseño de bioingeniería de aguas residuales del ACODAL y la aplicación de metodologías de estudios previos, III. Evaluar el recurso renovable, encontrando que por la situación geográfica de Bogotá existe una favorabilidad por factores como la precipitación, el clima, la temperatura y la caracterización del agua residual, IV. Analizar tres escenarios que se desarrollan en función del porcentaje de metano para evaluar el impacto económico por la producción energética y por el ahorro de la PTAR y el impacto ambiental.

En este sentido, dentro de los principales resultados se planteó el diseño de 10 modelos de digestores, cada uno con una capacidad de 9.483 m³ y un potencial eléctrico total de 14,5MWh. La evaluación de impactos ambientales señaló, por una parte, mayores impactos negativos en la fase de construcción con el 51%, además, se identificaron impactos socioeconómicos positivos para la población gracias a la fase de operación y mantenimiento con un 46%. La comparación con otros estudios indicó un buen potencial energético y la necesidad de cuantificar el análisis elemental e inmediato en la planta para mejorar continuamente la eficiencia del digestor.

Palabras clave: (Aguas Residuales, Análisis elemental, Poder Calorífico, Metano, Biogás).

Abstract

In the present study, the design of an anaerobic digester for sludge utilization and biogas production was carried out at the El Salitre Wastewater Treatment Plant (WWTP). Its operation focuses on treating wastewater from approximately 3.2 million inhabitants in an urban area and various industries. This primarily allowed: I. Consolidation of design requirements with relevant data such as infrastructure location, a digester feed of 419,000 lb/day, hydraulic retention time greater than 20 days, and pH between 7 and 8, II. Identification of the necessary methodology for sizing the digester structure, guided by the wastewater bioengineering design from ACODAL and the application of previous study methodologies, III. Evaluation of the renewable resource, finding favorability due to Bogotá's geographical situation, considering factors such as precipitation, climate, temperature, and wastewater characterization, IV. Analysis of three scenarios developed based on methane percentage to assess the economic impact of energy production and savings for the WWTP, and the environmental impact.

In this regard, among the main results, the design of 10 digester models was proposed, each with a capacity of 9,483 m³ and a total electrical potential of 14.5 MWh. The environmental impact assessment indicated, on the one hand, higher negative impacts in the construction phase at 51%; furthermore, positive socio-economic impacts were identified for the population during the operation and maintenance phase at 46%. Comparison with other studies highlighted good energy potential and the need to quantify elemental and proximate analysis in the plant to continually improve the efficiency of the digester.

Keywords: (Wastewater, Elemental Analysis, Calorific Value, Methane, Biogas).

Índice de contenidos

Introducción	10
1. Contexto y estado del arte	13
1.1. Marco teórico	14
1.1.1. Clasificación del sustrato	14
1.1.2. Caracterización del sustrato	15
1.1.3. Técnica de caracterización del sustrato	17
1.1.4. Parámetros de control.....	18
1.1.5. Técnicas de pretratamiento	20
1.1.6. Digestión anaerobia.....	22
1.1.7. Biocombustible Gaseoso: Biogás.....	23
1.1.8. Producción de energía térmica y electricidad.....	25
1.2. Estado del arte	25
1.2.1. Estudio 1: Revisión del alcance de las opciones para aumentar la producción del biogás a partir de lodos de depuradora: Desafíos y oportunidades para mejorar autosuficiencia energética en PTAR.....	26
1.2.2. Estudio 2: Análisis experimental y de simulación de la producción de biogás a partir de lodos de aguas residuales de bebidas para la generación eléctrica	27
1.2.3. Estudio 3: Diseño de un digestor anaerobio para co-digestión de fangos de depuración y residuos líquidos de la industria alimentaria	28
1.2.4. Estudio 4: Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano	29
1.2.5. Estudio 5: Evaluación del potencial de las fuentes de energía renovables en un tratamiento con digestor de manta de lodos anaeróbico de flujo ascendente a gran escala. Aguas residuales de Ghana	30

1.2.6. Estudio 6. Evaluación técnica del tratamiento y manejo de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (PTAR SALITRE)	32
2. Objetivos del TFE	33
2.1. Objetivo general.....	33
2.2. Objetivos específicos	33
3. Hipótesis de trabajo	34
4. Requisitos de diseño	35
4.1. Datos de partida	35
4.2. Ubicación de la instalación	36
4.3. Normatividad colombiana aplicable.....	38
5. Metodología.....	40
6. Evaluación del recurso renovable	41
7. Diseño de la instalación.....	45
8. Análisis económico.....	49
8.1. Escenario actual 67,26% de metano.....	51
8.2. Escenario 70% de metano	52
8.3. Escenario 40% de metano	52
9. Análisis ambiental	54
10. Resultados	60
10.1. Resultado del componente económico	62
10.2. Resultado del componente socioambiental	64
10.3. Comparación con estudios analizados.....	65
10.4. Recomendaciones	68
11. Conclusiones.....	70
12. Referencias bibliográficas.....	72

13. Anexos 76

Índice de figuras

Figura 1 <i>Comparación de los valores de poder calorífico bruto y neto en el estudio 5</i>	31
Figura 2 <i>Ubicación geográfica del área de estudio</i>	37
Figura 3 <i>Diagrama de flujo típico en el tratamiento anaerobio</i>	38
Figura 4 <i>Caudal medio mensual de entrada en la PTAR El Salitre</i>	43
Figura 5 <i>Estructura y dimensionamiento del digestor anaerobio</i>	46
Figura 6 <i>Porcentaje de impacto en el ciclo de vida del digestor anaerobio</i>	56
Figura 7 <i>Porcentaje de impacto en el ciclo de vida del digestor anaerobio</i>	57
Figura 8 <i>Análisis inmediato del sustrato</i>	76
Figura 9 <i>Fases de la digestión anaeróbica</i>	77
Figura 10 <i>Técnicas e instrumentos para la remoción de impurezas en el biogás</i>	78
Figura 11 <i>Estructura funcional del digestor anaerobio, cogeneración y producción de energía</i>	79
Figura 12 <i>Enfoques de investigación Estudio 1</i>	80
Figura 13 <i>Metodología de investigación Estudio 2</i>	81
Figura 14 <i>Metodología y resultados de investigación Estudio 4</i>	82
Figura 15 <i>Metodología para el estudio 5</i>	83

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Caracterización del sustrato</i>	15
Tabla 2 <i>Caracterización de los parámetros en agua cruda y tratada</i>	17
Tabla 3 <i>Técnica de caracterización del sustrato</i>	17
Tabla 4 <i>Parámetros de control para la digestión anaerobia</i>	18
Tabla 5 <i>Rango de temperatura y tiempo de digestión por tipo de digester</i>	20
Tabla 6 <i>Técnicas de pretratamiento para la digestión anaerobia</i>	20
Tabla 7 <i>Fases de la digestión anaerobia</i>	22
Tabla 8 <i>Características del Biogás</i>	24
Tabla 9 <i>Datos para el dimensionamiento del digester anaerobio</i>	36
Tabla 10 <i>Normatividad aplicable para prestadores de servicio público de alcantarillado</i>	39
Tabla 11 <i>Ecuaciones para la determinación de parámetros y dimensiones del digester anaerobio</i>	40
Tabla 12 <i>Características de la localización del digester anaerobio</i>	41
Tabla 13 <i>Promedio del costo total de la instalación</i>	49
Tabla 14 <i>Promedio de costo y consumo eléctrico para el análisis económico</i>	50
Tabla 15 <i>Promedio del costo por generación de electricidad Metano (67,26%)</i>	51
Tabla 16 <i>Promedio del costo por generación de electricidad Metano (70%)</i>	52
Tabla 17 <i>Promedio del costo por generación de electricidad Metano (40%)</i>	53
Tabla 18 <i>Ahorro en cada escenario de la producción de metano</i>	53
Tabla 19 <i>Criterios de ponderación de impactos ambientales</i>	54
Tabla 20 <i>Propuestas de medidas de mitigación frente a los impactos ambientales</i>	58
Tabla 21 <i>Resultados del caudal, volumen y dimensiones del diseño del digester anaerobio</i> ..	60
Tabla 22 <i>Resultados de la destrucción de SSV y producción energética</i>	62
Tabla 23 <i>Resultados del componente económico para el diseño del digester anaerobio</i>	63

Tabla 24 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 1</i>	65
Tabla 25 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 2</i>	65
Tabla 26 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 3</i>	66
Tabla 27 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 4</i>	67
Tabla 28 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 5</i>	67
Tabla 29 <i>Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 6</i>	68
Tabla 30 <i>Matriz de la evaluación de impacto ambiental en el ciclo de vida del digestor anaerobio</i>	84

Introducción

En el desarrollo urbano es importante considerar la necesidad de interceptar agua para el uso doméstico, comunitario e industrial como parte del bienestar humano y de desarrollo económico, sin embargo, las aguas residuales producto de dichas actividades requieren de un tratamiento óptimo que mitigue y compense los impactos negativos que se desencadenan en la función ecológica y en su posterior consumo (Loaiza, 2009).

En Colombia aún persiste un grave déficit en el tratamiento de aguas residuales. Según datos oficiales, apenas el 52% de las aguas residuales reciben tratamiento, lo que significa que cerca de la mitad se vierten sin ningún proceso de depuración, generando graves impactos ambientales, ante este panorama, el Gobierno ha presentado un ambicioso plan nacional de manejo de aguas residuales 2020-2050, que busca incrementar la cobertura y diseño de sistemas de tratamiento al 68,6% en el 2030 (COLPRENSA, 2022).

Se ha identificado la deficiente operatividad de las plantas de tratamiento existentes y la falta de optimización en el tratamiento de lodos, sin embargo, no existen suficientes investigaciones que dimensionen la frecuencia y las causas de estos problemas operativos. Se requieren diagnósticos precisos y medidas urgentes para garantizar el adecuado funcionamiento de la infraestructura de saneamiento existente, como condición indispensable para avanzar en las metas de tratamiento de aguas residuales (WaterAid, 2020).

Por ello, los lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)¹ no son aprovechados adecuadamente debido al desconocimiento sobre sus posibles usos, como resultado, estos lodos suelen ser enviados a empresas de manejo de residuos peligrosos o dispuestos en rellenos sanitarios por razones económicas. De esta manera, se desaprovecha el gran potencial que tienen estos lodos y en lugar de maximizar los beneficios son tratados únicamente como desechos contaminantes (Vasquez, 2018).

A partir de lo anterior, se tuvo la iniciativa de contextualizar el estado actual específicamente de la PTAR El Salitre, objeto de estudio, ubicada en la ciudad de Bogotá, en el departamento

¹ La PTAR tiene por objetivo interceptar las aguas residuales de una zona urbana o rural para su posterior tratamiento, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, que permitirán remover contaminantes (Ramón, 2010).

de Cundinamarca en Colombia, a partir, de la recopilación de información primaria y visita en sus instalaciones, logrando identificar aspectos como: I. Los lodos no pueden ser aprovechados como abono agrícola por su alto contenido de patógenos, metales pesados y coliformes, II. Los lodos residuales no logran disminuir significativamente la humedad, pero aún existe la incertidumbre del por qué, se mencionan algunos supuestos como deficiencias en los procesos, las características de los lodos, tiempos de retención bajos o problemas en la digestión anaerobia, III. El poder calorífico impacta directamente en la producción y viabilidad económica del biogás, por lo que es un parámetro de diseño y operación crítico en digestores anaerobios, sin embargo, no se identifican instalaciones para la medición de parámetros biológicos o químicos que permitan estimar y mejorar el potencial energético del digestor.

En este sentido, no solamente la implementación de digestores anaerobios si no la optimización para el tratamiento de lodos residuales es una alternativa promisoría, pues permitiría la recuperación energética en forma de biogás y producción energética, además de mejorar la calidad de los lodos para posibles usos posteriores. Sin embargo, el deficiente conocimiento sobre el poder calorífico de los sustratos limita un diseño adecuado de estas tecnologías. Por lo tanto, el desarrollo de un estudio para el diseño y optimización que integre la cuantificación del poder calorífico de los lodos residuales, se justifica plenamente como una contribución concreta a la problemática del saneamiento y optimización de procesos en la PTAR El salitre. Los resultados de este estudio sentarían bases técnicas para mejorar el funcionamiento de las PTAR en general y avanzar en las metas de tratamiento de aguas residuales de forma sostenible.

De lo anterior, se desglosa el presente estudio en trece (13) capítulos, los cuales hacen referencia a: I. El contexto, marco teórico y estado del arte, II. El objetivo general y los objetivos específicos, III. La hipótesis de trabajo, IV. Los requisitos de diseño que se componen de los datos de partida, la ubicación de la instalación y la normatividad colombiana aplicable, V. La metodología que involucra todas las ecuaciones necesarias para el diseño del digestor, VI. La evaluación del recurso renovable en cuanto a temáticas climatológicas o meteorológicas de la zona, VII. El diseño de la instalación, el cual desarrolla las ecuaciones metodológicas, VIII. Análisis económico, cuyo objetivo se centra en identificar el ahorro energético según la eficiencia, IX. Análisis ambiental de los impactos tanto positivos como negativos en el ciclo de vida de la digestión anaerobia, X. Los resultados a partir de los objetivos e hipótesis, XI.

Conclusiones, XII. Las referencias bibliográficas que permiten argumentar el presente estudio y XIII. Los anexos que contienen diagramas propios en su mayoría con el objetivo de sintetizar y dar a entender algunos conceptos técnicos del desarrollo teórico y estado del arte. Además, se puede visualizar los resultados de la matriz de impacto ambiental.

1. Contexto y estado del arte

De acuerdo a la RAE 2022, la biomasa se define como <<La materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía>>. En este sentido, la materia orgánica originada se debe en parte a procesos antrópicos que generan aguas residuales de tipo industrial o doméstico, las cuales son interceptadas por plantas de tratamiento de aguas residuales.

En este proceso, el agua residual que entra a la planta tiene una caracterización particular que depende de la zona en la cual se presenta el desarrollo antrópico, sin embargo, su composición volumétrica generalmente contiene el 99,8% de agua y el 0,2% de sólidos suspendidos y sólidos disueltos; estos últimos representan una composición particular de materia orgánica (compuestos orgánicos, nutrientes, microorganismos) y otra de materia inorgánica como sólidos inertes (plásticos, escombros, etc.), cuya mezcla consolida posteriormente la presencia de lodos que actuarán como sustrato para la generación del Biogás (Guzzo, 2016).

El tratamiento de aguas residuales ha resaltado la necesidad de considerar el aprovechamiento de lodos con el diseño e instalación de digestores anaerobios por aspectos como: I. El aumento de la población y la urbanización, que resulta en un incremento en la cantidad y concentración de contaminantes en las aguas residuales, II. La presencia de contaminantes patógenos en los lodos residuales, con efectos perjudiciales para la salud humana y el entorno ambiental, III. El desperdicio de lodos ricos en nutrientes, lo que representa una pérdida de recursos valiosos que podrían ser reutilizados de manera importante en la producción de energía, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (UNESCO, 2017), IV. El consumo de recursos como energía y agua debido a la falta de gestión y disposición adecuada de lodos sin tratar, lo que genera una insostenibilidad a largo plazo, V. El manejo de lodos en una PTAR puede llegar a representar el 50% de costos de operación y mantenimiento, por ello es necesario aprovechar y optimizar la producción de biogás, que tiene el potencial de suministrar energía necesaria en la planta (Rodríguez, 2019).

En este sentido, se continúan evaluando estrategias para promover la reutilización de los lodos de aguas residuales, lo que en última instancia contribuye a la economía circular y a la sostenibilidad.

Es importante considerar la complejidad que lleva consigo en aspectos como: I. La composición de los lodos que varían según su fuente y procedencia, lo que requiere de un manejo específico y singular II. La variedad de contaminantes desde materia orgánica hasta metales pesados que puede dificultar el manejo y disposición de los lodos, III. El cumplimiento de las normativas y regulaciones particulares a nivel nacional y regional y IV. La cooperación logística desde la cultura ciudadana hasta la articulación de las entidades territoriales para su manejo.

1.1. Marco teórico

Para el desarrollo del presente estudio es importante conceptualizar los términos principales que serán aplicados y analizados en el diseño y optimización del digestor anaeróbico, además, de permitir argumentar y sustentar la hipótesis propuesta plasmada en el capítulo tres (3). Estos se presentan a continuación.

1.1.1. Clasificación del sustrato

Es importante mencionar que existen diferentes tipos de lodos: I. El lodo primario (agua residual) no estabilizado biológicamente con un alto valor energético para la digestión anaerobia, que se encuentra en el sedimentador primario o trampa de grasas, II. El lodo secundario como biomasa no estabilizada biológicamente, con un alto valor energético en la etapa de lodos activados o biofiltros aerobios de alta carga, III. El lodo estabilizado biológicamente para lograr la digestión anaerobia de compuestos orgánicos en tecnologías como el tanque séptico, tanque Imhoff, digestor UASB, digestor anaerobio con mamparas entre otros y IV. El lodo estabilizado biológicamente de forma aerobia, cuya biomasa tiene baja carga orgánica y se presenta en lodos activados en aireación extendida, digestores de baja carga y lagunas de estabilización (SENER, 2017). De lo anterior, es importante considerar relevante el uso del tercero, es decir del lodo estabilizado para el funcionamiento de la digestión anaerobia.

1.1.2. Caracterización del sustrato

Como se mencionó anteriormente, el sustrato permite la generación del Biogás; por ello es importante caracterizarlo, para poder determinar el rendimiento y eficiencia en la digestión anaeróbica. En este sentido, se presenta la descripción de algunos parámetros relevantes como los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos volátiles (SV), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el contenido energético como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1 Caracterización del sustrato

Caracterización	Descripción
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Se refiere a las partículas sólidas orgánicas e inorgánicas que se encuentran suspendidas en el agua residual. Por una parte, la cantidad de SST puede dificultar la mezcla y por ende el movimiento de los fluidos del digestor, reduciendo la eficiencia de la digestión, además, puede influir en el tiempo de retención hidráulica. De otra parte, la carga orgánica biodegradable genera un beneficio, aumentando la producción de biogás (Lima, 2023). Se asume una producción de 0,6kgSST por kg de remoción de DBO (Mañuga, 2012).
Sólidos Volátiles (SV)	Los sólidos volátiles representan el 80% de los SST, los cuales son fermentados para producir biogás y cuya composición resulta una mezcla de elementos con el 30% de carbono, 5% de nitrógeno y 65% de otros elementos como el hidrógeno, oxígeno, azufre entre otros (Osorio, 2007).
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Se refiere a la cantidad de materia orgánica biodegradable en una muestra que puede ser descompuesta por microorganismos en condiciones aeróbicas, sin embargo, en la digestión anaeróbica puede suministrar información de la cantidad de materia orgánica que podría

Caracterización	Descripción
	ser transformada en biogás. Se presentan promedios de DBO entre 200 y 300 en aguas residuales (Lima,2023).
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Hace referencia a la cantidad de oxígeno disuelto que descompone la materia orgánica, este parámetro es importante para evaluar la carga orgánica de los sustratos que llegan al digestor anaeróbico. Inicialmente la concentración del afluente oscila en rangos entre 0,3 y 1g/L y después del tratamiento puede llegar a 0,02g/L (Lima2023).
Relación Carbono Nitrógeno (C/N)	Por una parte, el carbono tiene como propósito aportar la energía para que se consolide la actividad microbiana, de otra parte, el nitrógeno aporta en el crecimiento celular microbiano. La relación C/N hace referencia a la proporción de carbono con respecto al nitrógeno en el sustrato, es importante que esta sea estable ya que puede beneficiar la producción de biogás, de lo contrario un exceso de carbono puede generar la acumulación de ácidos volátiles de cadena larga que inhiben la actividad microbiana por causas como la disminución de pH, o el exceso de nitrógeno forma grandes cantidades de amoníaco que pueden ser tóxicos para los microorganismos e igualmente inhiben su desarrollo. En este sentido, se considera óptima la relación de C/N en rangos entre 30:1 y 20:1, lo que se traduce en que por cada gramo de nitrógeno deben existir 30 o 20 gramos de carbono respectivamente (Bennardi, 2021).

Fuente: Autor, 2023.

Tomando como referencia los datos de caracterización de agua cruda y agua tratada promedio, desde el 16 de diciembre de 2021 hasta mayo de 2023, se obtiene el 92% de remoción de SST, 92% de remoción de DBO₅ y 84% de remoción de DQO, lo que permite inferir que hay un gran porcentaje de materia orgánica que ha sido convertido en Biogás como se muestra en la Tabla 2, además, presenta una remoción interesante para el cumplimiento de la licencia ambiental fijado en 40% para DBO y 60% para SST.

Tabla 2 *Caracterización de los parámetros en agua cruda y tratada*

Parámetro	Agua cruda	Agua tratada	Remoción
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	150,9 mg/L	12,11 mg/L	92%
DBO₅	201,6 mg/L	16,2 mg/L	92%
DQO	450,8 mg/L	71,6 mg/L	84%

Fuente: Autor a partir de información de la CAR, 2023

1.1.3. Técnica de caracterización del sustrato

La técnica de caracterización del sustrato, se refiere al conjunto de métodos y procedimientos utilizados para analizar y evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato en función de la producción de biogás a partir del aprovechamiento de lodos, como la digestión anaeróbica. De lo anterior se hace referencia al análisis elemental y al análisis inmediato del sustrato los cuales permiten determinar el poder calorífico con la información de los elementos y de las cenizas como se describe en la Tabla 3 y en el Anexo Figura 8.

Tabla 3 *Técnica de caracterización del sustrato*

Técnica	Descripción
Análisis elemental	El análisis elemental hace referencia a una técnica de laboratorio utilizada para determinar la composición elemental de una muestra, es decir, la cantidad de cada elemento químico presente en el sustrato. Esta técnica se basa en la medición precisa de la masa o el porcentaje en peso de elementos como el Nitrógeno (N), Carbono (C), Hidrógeno (H), y azufre (S) para calcular por ejemplo el poder calorífico (Adantey Arthur, 2023).

Técnica	Descripción
Análisis inmediato del sustrato	Es un proceso analítico que se determina a través de la cuantificación del contenido de las cenizas, del carbono fijo, de la humedad y de los compuestos volátiles de una muestra (Figura 2). Cuando se define esta información en base seca, se obtiene de 10-30% de peso de carbono fijo, de 1-20% en cenizas y de 70-90% de peso de compuestos volátiles, con una humedad variante (Nogués, 2017) (Figura 8).

Fuente: Autor, 2023.

1.1.4. Parámetros de control

Los parámetros de control permiten crear los medios y las condiciones óptimas para el desarrollo microbiano y la biodegradación de la materia orgánica, es por ello que se debe considerar factores como el pH, la temperatura, la retención hidráulica y la tasa de carga orgánica como se describe en la Tabla 4 , y de esta manera optimizar los procesos en la digestión anaerobia.

Tabla 4 *Parámetros de control para la digestión anaerobia*

Caracterización	Descripción
Potencial de Hidrógeno (pH)	Es importante resaltar que el potencial de hidrógeno se encuentra en un rango entre 1 y 14, en donde se considera ácido de 1 – 6, neutro 7 y alcalino de 8-14. Los efectos se perciben en la actividad enzimática de los microorganismos en relación al cambio de los grupos carboxilos y aminos o en la modificación de compuestos no enzimáticos. Se considera mantener un pH neutro (7), en este caso se debe contemplar los métodos para regular dicho indicador a través de la adición de cal, ácido orgánico, agua residual o disminución de carga orgánica, lo cual está sujeto a las necesidades particulares (Acosta, 2005).

Caracterización	Descripción
Temperatura	<p>Los digestores anaerobios normalmente operan en rangos mesofílicos entre 34° y 37°C, pocas veces en rangos termofílicos que son superiores entre 52 a 60°C, ya que en este último se ha percibido inestabilidad en las modificaciones de la operación y promueve la inhibición de los microorganismos por altas temperaturas en presencia de nitrógeno amoniacal o ácidos grasos de cadena larga (Morales, 2017).</p>
Retención Hidráulica (HR)	<p>Se refiere al tiempo necesario para que se complete la biodegradación del sustrato en el biodigestor. Este se encuentra en función de: I. El tipo de sustrato, en donde depende de la composición y por ende su biodegradación, II. La temperatura, si esta es alta, permite considerar un menor tiempo de retención y menor volumen en el digestor y III. El tipo de digestor, encontrando por una parte que en biodigestores discontinuos o batch, el tiempo es equivalente al tiempo de permanencia del material biodegradable, de otra parte, en digestores continuos y semicontinuos es equivalente al <<valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria>> (Bennardi, 2021). Habitualmente en las plantas de tratamiento se considera igual el tiempo de permanencia de las bacterias y del sustrato (Lima, 2023).</p>
Carga orgánica	<p>Se refiere a la cantidad de carbono del sustrato en el digestor por un periodo de tiempo, es importante que incremente para aumentar la producción de biogás sin exceder su concentración, dado que puede inhibir y disminuir el rendimiento. Este parámetro influye en: I. El volumen del tamaño del digestor el cual se encuentra relacionado con el flujo del lodo y los procesos de pretratamiento y II. El mezclado que aumenta la superficie de contacto microbiano y evita la formación de espuma, debido a que esta disminuye la capacidad de almacenamiento disponible de materia orgánica.</p>

Fuente: Autor, 2023

En este sentido, se identifican los rangos de temperatura y tiempos de digestión anaeróbica por tipo de digestor es decir psicofílico, mesofílico y termofílico como se muestra en la Tabla 5. Cabe mencionar que el digestor utilizado en la PTAR es mesofílico por lo que se retomará dicha información en la discusión de resultados.

Tabla 5 Rango de temperatura y tiempo de digestión por tipo de digestor

Tipo digestor	Rango de temperatura (°C)			Tiempo de digestión anaeróbica (días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	
Psicofílico	4-10	15-18	20-25	>100
Mesofílico	15-20	25-35	35-45	30-60
Termofílico	25-45	50-60	75-80	10-15

Fuente: Autor, 2023 a partir de (Morales , y otros, 2017).

1.1.5. Técnicas de pretratamiento

Si se requiere intensificar la velocidad de la etapa limitante en el proceso anaeróbico o tratar lodos de difícil biodegradación, entre otros, se suele utilizar un pretratamiento, esto además disminuye los tiempos de retención hidráulica y el volumen utilizado en el digestor (Pintado, 2017). Por ello, se describen algunos pretratamientos como la transformación térmica, térmica hidrólisis, transformación química y co-digestión como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Técnicas de pretratamiento para la digestión anaerobia

Caracterización	Descripción
Transformación Térmica	Este pretratamiento tiene como objetivo principal reducir la viscosidad, mejorar la accesibilidad de los microorganismos y descomponer las partículas sólidas en materiales orgánicos. A menudo, implica calentar los

Caracterización	Descripción
	materiales a temperaturas moderadas (alrededor de 70°C), por debajo de las temperaturas típicas de la hidrólisis. Esto resulta en una reducción del consumo energético en un 40% y un aumento del 50% en la producción de biogás. La transformación térmica no conduce a una descomposición completa de la materia orgánica (Chiva Vicent, 2018).
Térmico de Hidrólisis	En este proceso, se aplican temperaturas entre 140 y 200°C, junto con presiones de 6 a 20 bar durante aproximadamente media hora a lodos residuales. Esto descompone las células en compuestos orgánicos de cadenas largas y solubiliza algunos sólidos en suspensión. Como resultado, se obtiene una alta concentración de DQO y una baja viscosidad, lo que mejora la biodegradación en la digestión anaerobia. La hidrólisis térmica facilita el acceso de los microorganismos a los componentes orgánicos, aumentando la producción de biogás y reduciendo la cantidad de residuos sólidos (Arroyo & Patricia, 2015).
Transformación química	La transformación química implica el acondicionamiento químico mediante la adición de ácidos o bases (como carbonato de calcio, hidróxido de sodio, cal, etc.), según la naturaleza o composición del sustrato. También se utiliza la coagulación o floculación para mejorar la separación de sólidos y líquidos en los lodos. El objetivo es ajustar el pH para favorecer el crecimiento de microorganismos ya que un pH bajo reduce el desarrollo de los microorganismos metanogénicos, mientras que un pH alto aumenta la acumulación de amoníaco (Pintado, 2017).
Co-digestión	Se lleva a cabo a partir de la mezcla de dos o más sustratos con el objetivo de mejorar la producción de metano en la digestión anaerobia, incrementar el rendimiento en el sistema, favorecer el balance de nutrientes y humedad y evitar la inhibición por compuestos como el amoníaco.

1.1.6. Digestión anaerobia

Después aplicar alguna técnica de pretratamiento, se espera optimizar el aprovechamiento de los lodos en la digestión anaerobia, cuyo proceso implica la transformación biológica de la materia orgánica en cuatro (4) fases de conversión, estas son, hidrólisis, acidogénesis, acetogénica y metanogénesis (Anexo Figura 9). En estas fases actuarán bacterias fermentativas acidogénicas, bacterias sintróficas acetogénicas y arqueobacterias metanogénicas las cuales favorecerán los procesos como se describe en la Tabla 7 (SENER, 2017).

Tabla 7 *Fases de la digestión anaerobia*

Caracterización	Descripción
Hidrólisis	Se encarga de transformar compuestos complejos en moléculas más solubles y degradables, por ello las bacterias liberan enzimas para que las proteínas, carbohidratos y lípidos se conviertan en aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes, sin embargo, algunos sustratos pueden tener altos contenidos de celulosa, proteínas complejas, grasas o lípidos que son difícilmente hidrolizables afectando la acidogénesis. Cabe resaltar que la celeridad del proceso depende de factores como la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica, pH, tamaño de las partículas (FAO, 2011).
Acidogénesis o fermentación	Permite que las bacterias metanogénicas puedan utilizar compuestos más reducidos gracias a la fermentación, además de eliminar presencia de oxígeno disuelto en el sistema. También permite que las bacterias acetogénicas puedan oxidar dichos compuestos en la siguiente fase (FAO, 2011).
Acetogénica	Presenta dos situaciones: I. Un grupo de bacterias transforman el acetato y producen hidrógeno y dióxido de carbono, II. Otro grupo de bacterias

Caracterización	Descripción
	que consumen hidrógeno y dióxido de carbono para producir acetato (FAO, 2011).
Metanogénesis	Es una de las más importantes ya que se produce metano, sin embargo, es importante mantener un pH neutro o ligeramente alcalino ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles y ante una acidez se pueden inhibir. En esta fase se consume el hidrógeno y el acetato de las fases previas y al finalizar la degradación anaerobia se produce dióxido de carbono y metano, compuestos del biogás (FAO, 2011).

Fuente: Autor, 2023

En las aguas residuales y en los lodos pueden existir compuestos de azufre los cuales son utilizados por microorganismos sulfatorreductores para oxidar compuestos orgánicos, de aquí que se generen gases de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. Esto generalmente disminuye la producción de metano y calidad del biogás y produce impactos negativos en el proceso del digestor.

1.1.7. Biocombustible Gaseoso: Biogás

En general, el biogás puede contener una variedad de gases, incluyendo trazas de otros compuestos orgánicos e inorgánicos, pero el metano es el gas predominante. La proporción relativa de metano y dióxido de carbono en el biogás puede variar según el tipo de material orgánico que se esté digiriendo, las condiciones del proceso y el sistema de producción, sin embargo, en un biogás de buena calidad, el contenido de metano suele ser mayor que el 50% y puede llegar hasta el 70% o más, mientras que el dióxido de carbono constituye la mayor parte del resto incluyendo algunas impurezas. La caracterización del biogás se presenta en función del sustrato, sin embargo, se toma como referencia los valores generales de su composición, contenido energético, equivalente de combustible, límite de explosión, temperatura de ignición y olor, los cuales permiten en dado caso realizar un monitoreo o un

análisis del aprovechamiento y la precaución de su almacenamiento, los valores para estas características se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 *Características del Biogás*

Característica	Valor
	55 – 70% CH ₄
Composición	30 – 45% CO ₂
	Contenido de otros gases (H ₂ S)
Contenido energético	6 – 6,5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0,6 – 0,65L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750°C con el porcentaje de CH ₄
Olor	Huevo podrido

Fuente: Autor, 2023 a partir de (Morales , y otros, 2017)

Existen técnicas y equipos que se utilizan en combinación o de manera individual, según las características específicas del biogás y las impurezas presentes. La elección de la técnica y el instrumento adecuado depende de factores como la concentración de impurezas, los objetivos de purificación y las condiciones operativas. El monitoreo continuo de la calidad del biogás es esencial para garantizar la eficacia del proceso de purificación y mantener la calidad del biogás dentro de los estándares requeridos. Para aumentar el porcentaje de composición de metano en el biogás es importante aplicar técnicas e instrumentos para la remoción de impurezas como por ejemplo con el uso de secadores de gas, soluciones alcalinas o torres de absorción según sea el caso como se muestra en el Anexo: Figura 10.

1.1.8. Producción de energía térmica y electricidad

En los digestores anaerobios, el biogás se acumula en la parte superior. El biogás capturado se extrae del digestor y se transporta a un sistema de tratamiento y purificación para eliminar impurezas, como se mencionó anteriormente, dichas impurezas como dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos volátiles (COVs) o humedad, pueden dañar los equipos de generación. Posteriormente el biogás purificado se utiliza para generar energía eléctrica y térmica en un sistema de cogeneración o planta de cogeneración, cuya funcionalidad es producir simultáneamente dos formas de energía útil a partir de una única fuente de energía primaria. Las dos formas de energía producidas típicamente son electricidad y calor térmico (energía térmica).

El cogenerador está equipado con un motor de combustión interna o una turbina de gas que quema el biogás para generar electricidad, el movimiento mecánico generado por la combustión se utiliza para hacer girar un generador eléctrico que produce energía eléctrica. Además de la generación de electricidad, el proceso de combustión en el cogenerador produce calor residual, este se recupera y se utiliza para calefacción o para alimentar procesos industriales que requieren energía térmica, dicho proceso se muestra en el Anexo Figura 11.

Es importante resaltar que este proceso no solo ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuye a la gestión sostenible en la demanda energética del uso de las plantas de tratamiento.

1.2. Estado del arte

Considerando el contexto mencionado hasta este momento, es importante identificar y articular algunos análisis e investigaciones en relación al diseño e instalación anaeróbica, el aprovechamiento de lodos, producción de biogás y producción energética. Por ello, se realiza una breve síntesis con los aspectos más relevante de seis (6) estudios; el primero consolida una revisión teórica y conceptual de diferentes estudios para concluir los retos actuales de esta línea de estudio, el segundo presenta el aprovechamiento energético a partir de una industria de bebidas, el tercero presenta los resultados por el aprovechamiento de una industria alimentaria, el cuarto presenta la investigación realizada en el lago Titicaca, lo que permite inferir sobre el aprovechamiento de un digestor termofílico, el quinto evalúa el

potencial energético por el aprovechamiento de una planta en Ghana y el sexto presenta la evaluación técnica del tratamiento y manejo de lodos en la PTAR El Salitre.

1.2.1. Estudio 1: Revisión del alcance de las opciones para aumentar la producción del biogás a partir de lodos de depuradora: Desafíos y oportunidades para mejorar autosuficiencia energética en PTAR

Este artículo tuvo como objetivo recopilar y analizar la literatura existente, para presentar los conceptos claves en relación a la optimización de la producción y el uso del biogás en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, buscó proporcionar una visión general de la situación actual en este campo para la comunidad de investigadores, operadores de plantas de tratamiento e ingenieros.

Cabe mencionar que, aunque se han realizado muchos estudios sobre este tema, todavía se requiere más investigación, especialmente para determinar la viabilidad económica de estas técnicas en plantas a gran escala. Uno de los principales desafíos es la inversión adicional y los costos operativos más altos que implica la implementación de estas nuevas técnicas en los sistemas existentes. Sin embargo, existe un gran interés en encontrar formas de mejorar la eficiencia energética y la autosuficiencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Como datos importantes en dicho análisis se identificó que:

- El costo de electricidad en una PTAR puede representar hasta un 60% de sus costos operativos.
- El tratamiento de 1ml de agua residual puede necesitar hasta de 1.400kWh.
- El tratamiento de lodos debe considerar la reducción de contaminantes, cantidad de materia orgánica y fracción de agua, estos representan entre un 1% y 2% del volumen total del agua residual.
- La PTAR que cuentan con un sistema de recuperación de biogás consumen un 40% menos de energía neta.
- Existen algunos digestores anaeróbicos que tienen el mismo objetivo, estos son el digestor de tanque agitado continuo (CSTR), el digestor anaeróbico con deflectores (ABR), el manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB), el lecho de lodo

granular expandido (EGSB), el digestor anaeróbico de lecho fluidizado (AFBR) y el filtro de manta de flujo ascendente (UBF).

En general, este estudio abarcó cuatro (4) enfoques de investigación; el primero en relación a la **optimización de los parámetros** de control de la digestión anaeróbica, en el cual se identificaron los parámetros incidentes y la aplicabilidad de modelos que tienen objetivos particulares, como por ejemplo la optimización de las etapas de digestión anaeróbicas o el mejoramiento de la eficiencia del proceso y producción del biogás, el segundo hace referencia a la **co-digestión** encontrando que la mezcla de dos o más materias primas favorecen la producción del biogás entre un 25% a 400% como por ejemplo la mezcla con grasas o aceite, desperdicios de alimentos entre otras, el tercero en relación a las **técnicas de pretratamiento** que benefician la biodegradabilidad y solubilidad de la materia prima; en las PTAR se utiliza regularmente la técnica térmica ya que al pasar por un tratamiento de calentamiento a 180°C por 30 minutos puede aumentar en un 150% la producción de biogás y por último la **metanación biológica del hidrógeno** que tiene por objetivo realizar un proceso de conversión para generar metano a partir de Dióxido de Carbono (CO₂) e Hidrógeno (H) con la ayuda de organismos de metanogénesis en un biodigestor anaeróbico como se muestra en el Anexo Figura 12.

1.2.2. Estudio 2: Análisis experimental y de simulación de la producción de biogás a partir de lodos de aguas residuales de bebidas para la generación eléctrica

El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de producción de biogás y metano en los lodos que se generaban en el agua residual de una industria de bebidas en términos de sólidos volátiles y volúmenes. En este proceso se utilizó un digestor anaeróbico discontinuo único para identificar su optimización a partir de diferentes parámetros: I. Temperaturas (25, 35 y 45 °C), II. Rangos de pH (5,5, 6,5, 7,5, 8,5 y 9,5) III. Proporciones de alimentación orgánica (1:3, 1:4, 1:5, 1:6) para la estabilización y reducción de la materia orgánica contenida, IV. Retención hidráulica de 30 días.

Es importante mencionar que la metodología se centró en caracterizar el sustrato, realizar un análisis definitivo para evaluar la proporción de los compuestos del sustrato, analizar el

potencial de generación de electricidad con metano y estimar el valor calorífico de los residuos como se muestra en el Anexo: Figura 13.

Como resultado se identificó una máxima optimización en condiciones de pH de 8,5 (seguido de 9,5, 7,5, 6,5 y 5,5), temperatura de 35°C (seguido de 25° y 45°), proporción de carga orgánica de 1:3 (seguida de una proporción de 1:6, 1:4 y 1:5) y retención hidráulica de 24 días, obteniendo una producción de: I. Biogás de 15,4 m³/g de sólidos volátiles y un volumen de 9,3 m³ y II. Metano de 6,3 m³/g de sólidos volátiles y un volumen de 3,8 m³, III. Potencial eléctrico de 18,9kWh. El potencial total de generación de electricidad se cuantificó en 22,1kWh a los 40 días y con la optimización se generaba 83,0kWh a los 48 días.

En síntesis, este estudio demostró que los residuos líquidos de la industria de bebidas tienen un gran potencial como fuente valiosa para generar electricidad a través del proceso de producción de biogás mediante la digestión anaeróbica y la mejora de su contenido de metano. Esto no solo contribuye de manera significativa a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ofrece una fuente rentable y sostenible de energía para las necesidades tanto de la industria como de la comunidad local.

1.2.3. Estudio 3: Diseño de un digestor anaerobio para co-digestión de fangos de depuración y residuos líquidos de la industria alimentaria

El objetivo principal fue estudiar la producción del biogás a partir de un digestor anaerobio, con la posibilidad de realizar la co-digestión.

Características del Digestor:

- Tipo de reactor: Único reactor tanque continuamente agitado capacidad 120m³/d.
- Tiempo de retención: 20 días.
- Volumen del digestor: 3000 m³.
- Diámetro 24,8m y altura de 6,20m.
- Sistema de calefacción: Utiliza los gases de escape del grupo de generación para mantener la temperatura de reacción (temperatura mesófila).

Almacenamiento de Biogás:

- Se utiliza un gasómetro de doble membrana.

Diseño de un digestor anaeróbico para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás en la PTAR Salitre

de Bogotá, Colombia

- Volumen del gasómetro: 3500 m³.
- Permite desacoplar la generación y el consumo de biogás.

Uso del Biogás:

- El biogás se utiliza en un motor de combustión alternativo.
- Capacidad del motor: 330 kW eléctricos y 409 kW térmicos.

Este sistema está diseñado para aprovechar los residuos orgánicos mediante la digestión anaerobia, generando biogás que luego se utiliza eficientemente para la producción de energía eléctrica y térmica. La utilización de un gasómetro para almacenar el biogás permite un mejor control y gestión del suministro de gas, garantizando un suministro estable al motor de combustión. Finalmente, este tipo de sistemas son comunes en la gestión sostenible de residuos y la producción de energía renovable.

En cuanto al estudio económico se revela que la implementación de un sistema de digestión anaerobia con co-digestión de fangos, junto con la incorporación de una instalación fotovoltaica, presenta un ahorro significativo de 63733,85 €/año. Además, la combinación de estos sistemas podría eliminar completamente el costo del término de energía de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Se identifica que más allá de los beneficios económicos, esta iniciativa tiene un impacto positivo desde el punto de vista medioambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de combustibles fósiles al evitar el consumo de energía eléctrica de la red, destacando así su contribución a la sostenibilidad ambiental (Pelegrín, 2022).

1.2.4. Estudio 4: Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano

Este estudio se basó en el aprovechamiento de lodos que se encontraban ubicados en tres (3) lagunas de estabilización de aguas residuales, a través del diseño de un biodigestor anaerobio para la generación de metano; y en donde posteriormente se evaluó la producción de biogás. Cabe mencionar que la investigación se realizó en tres zonas circundantes (Puno, Juliaca, Ilave) al lago Titicaca que se caracteriza por estar a 3.812 msnm, con temperaturas que oscilan entre -1,3 a 16,8°C.

Como resultado se obtuvo la producción promedio de 36,7% de metano en 33 días sin diferencias significativas de las tres muestras de lodo residual LR, ya que presentaban concentraciones de materia orgánica similares, además, se identificó la importancia por una parte de controlar parámetros como el pH y temperatura, y de otra de considerar la co-digestión con la mezcla de otros materiales como el estiércol para abordar el bajo contenido de C/N como se muestra en el Anexo Figura 14. De lo anterior, se expone la necesidad de aumentar la calidad del metano para poder producir energía ya que se requiere entre un rango de generación de metano de 55 a 75%.

1.2.5. Estudio 5: Evaluación del potencial de las fuentes de energía renovables en un tratamiento con digestor de manta de lodos anaeróbico de flujo ascendente a gran escala. Aguas residuales de Ghana

El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de recuperación de energía en forma de electricidad, por medio de la producción y composición de biogás generado por el aprovechamiento de lodos en un digestor anaeróbico de flujo ascendente de manto de lodos (UASB). Es importante mencionar que los lodos deshidratados de los lechos de secado fueron caracterizados por medio de su composición elemental, composición inmediata, poder calorífico bruto y neto como se muestra en el Anexo Figura 15.

Los resultados presentaron aspectos relevantes como:

- Se identificó un caudal de aguas negras promedio de 4.096 m³/día lo que representa el uso de solo un cuarto de capacidad de la planta.
- Se caracterizó el biogás con proporciones promedio de 24,6% de Nitrógeno, 4,7% de dióxido de carbono, 5,7% de oxígeno y concentraciones bajas de sulfuro de hidrógeno entre 78 y 314 ppm.
- Se obtuvo un porcentaje máximo de 76,5% y mínimo de 54% de metano, con un promedio de 65% en la generación de biogás, lo que representó un potencial neto de recuperación de 534,1 MWh/año; dicha cifra supera la demanda energética de la planta en un 36% ya que requiere de 392,7 MWh/año para su funcionamiento. El flujo de biogás promedio se calculó en 611Nm³/día.

Por último y considerando que el poder calorífico bruto se refiere a la cantidad máxima de energía liberada en una combustión y el poder calorífico neto considera pérdidas como por ejemplo el calor latente en un proceso de vaporización del agua. Se realizó una comparación del poder calorífico bruto actual y teórico, obteniendo valores de 14,6 MJ/kg y 16,3 MJ/kg respectivamente. En cuanto al poder calorífico neto teórico y actual, se identificaron valores de 14 MJ/kg y 9,8 MJ/kg respectivamente como se muestra en la Figura 1. Esto permitió indicar que los valores teóricos fueron más altos que los actuales, lo cual puede atribuirse a la necesidad de eliminar impurezas o a la eficiencia del proceso de combustión, entre otros.

Figura 1 Comparación de los valores de poder calorífico bruto y neto en el estudio 5

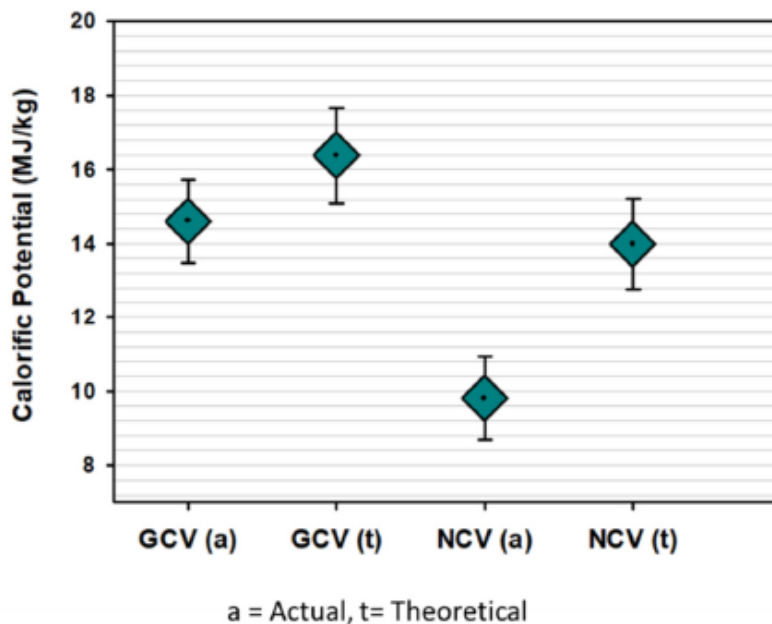


Figure 1. Actual and theoretical GCVs and NCVs for the dehydrated sludge of the Mudor WWTP.

Fuente: (Adantey Arthur, 2023)

Finalmente, indican que los digestores UASB son una buena oportunidad para países en desarrollo por su viabilidad económica.

1.2.6. Estudio 6. Evaluación técnica del tratamiento y manejo de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (PTAR SALITRE)

Como información relevante se menciona que, en el proceso de reducción de la materia volátil en los lodos a través de la digestión anaerobia mesofílica, se produce biogás con una concentración de metano de aproximadamente el 65% (valor típico). Es esencial extraer, tratar y, en este caso particular, buscar la posibilidad de reutilizar eficientemente este biogás. Hacen referencia de datos relevantes como la planificación de ocho (8) digestores adicionales con un diámetro de 33,50 m, una altura cilíndrica útil de 14,50 m y una altura cilíndrica total de 15,00 m y un El volumen útil por cada digestor estimado en 13.717,67 m³.

El biogás generado durante el proceso de digestión en donde pasa por un proceso de eliminación de contaminantes, puede ser aprovechado tanto como combustible para generar calor mediante la combustión en calderas, como para la generación de energía eléctrica en motores de cogeneración.

La electricidad producida contribuirá a reducir el consumo general de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) proveniente de la red eléctrica, mientras que el calor resultante puede ser recuperado del circuito de alta temperatura del motor y de los gases de escape para ser utilizado en el proceso de calefacción de los lodos, lo que a su vez contribuye a generar más biogás.

El análisis del balance energético del biogás sugiere la instalación de cinco (5) moto generadores, uno de ellos como reserva, con una potencia eléctrica unitaria de 1.890 kW para los picos del caudal máximo (Gómez, 2022).

2. Objetivos del TFE

Considerando el alcance del presente estudio, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos:

2.1. Objetivo general

Diseñar un digestor anaeróbico para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás considerando la optimización de los parámetros de control en la PTAR Salitre de Bogotá Colombia.

2.2. Objetivos específicos

- Recopilar información relevante que debe ser considerada en la optimización de la digestión anaerobia.
- Analizar el funcionamiento técnico de la instalación anaeróbica para el aprovechamiento de lodos y producción energética.
- Realizar un análisis económico de la producción energética generada y su influencia en el ahorro y la reducción de los costos operativos de la PTAR.
- Desarrollar una evaluación de impacto ambiental que infiera sobre los impactos generados en el ciclo de vida del digestor anaerobio.
- Realizar una comparación entre los resultados del presente estudio y de estudios previos del estado del arte.
- Generar las recomendaciones respectivas considerando las limitaciones en el desarrollo del presente estudio.

3. Hipótesis de trabajo

A partir de los objetivos, los cuales definen los propósitos del presente estudio y que además pueden presentar posibles fenómenos o información de interés en su desarrollo, resulta importante establecer una dirección específica para validarlos, esto a partir de la hipótesis.

En este sentido, el planteamiento de la hipótesis se basa en una afirmación de causalidad, en el cual se establece la relación de una variable causal que es la optimización en la producción energética y dos variables de efecto o de respuesta que son el ahorro energético y los impactos socioambientales, partiendo del siguiente cuestionamiento:

¿La optimización en el aprovechamiento de lodos impacta positivamente en el porcentaje de obtención de metano y por ende en la producción energética, aportando así, ahorros energéticos en la PTAR y una mayor autosuficiencia en el funcionamiento del digestor anaerobio, además, de promover impactos socioambientales, en su mayoría positivos, con su materialización y funcionamiento?

4. Requisitos de diseño

Una vez contextualizados los aspectos de los digestores anaerobios y el aprovechamiento de lodos, es necesario consolidar: I. Los datos iniciales necesarios para el diseño del digestor, II. La localización de dicha instalación en el cual se hará referencia a la demanda de energía de la PTAR, III. Las regulaciones o normativas pertinentes que establecen requisitos para el diseño del digestor anaerobio específicamente en Colombia.

4.1. Datos de partida

Los datos son la base para el diseño, la operación y el monitoreo efectivo de un digestor anaeróbico en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Estos datos permiten asegurarse de que el digestor funcione de manera eficiente y cumpla con los objetivos de tratamiento y producción de biogás. De lo anterior, el tipo de digestor que se va a diseñar es de tipo mesófilo de mezcla completa en donde su funcionamiento requiere de temperaturas entre 35°C y 38°C y debe estar equipado con un sistema óptimo de calentamiento y mezclado para mejorar el control de la temperatura y de la eficiencia en la producción de metano.

Tomando como referencia las proyecciones al año 2040 por la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR), se toman datos de la cantidad de sólidos por día que van a alimentar el digestor, la cantidad de lodo que ha pasado por un proceso de estabilización, la cantidad de materia sólida de los lodos espesados, la capacidad total de la condición de carga anual promedio o tiempo de retención que es mayor a 20 días, el pH, entre otros. Retomando la información plasmada en los parámetros de control, es importante mencionar la importancia del monitoreo del pH para garantizar un medio óptimo para los microorganismos, además, al proporcionar una mayor temperatura en el sistema, en este caso mesófilo, permite que el tiempo de retención hidráulica sea menor.

Cabe resaltar que un limitante importante es la ausencia de datos para determinar el análisis elemental y el análisis inmediato del sustrato, lo que permitiría aplicar la ecuación de la obtención del poder calorífico con mayor precisión, lo que implica tomar un valor de referencia utilizado en otros estudios, por ello, se considera un poder calorífico del metano teórico de 22400 kJ/m³ (Rodríguez L. M., 2022) como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Datos para el dimensionamiento del digestor anaerobio

Parámetro	Promedio
Alimentación digestores	418.137lbM.S./d
Producción total lodo estabilizado (M.S. ²)	189.666,94kg M.S./d
Concentración de lodos mixto espesado	50 kg/m ³
Tiempo de Retención Hidráulica	>20 días
pH	7,33
Altura hidráulica	14,2 m
Poder calorífico teórico	22400 kJ/m ³
Destrucción proyectada de SV	44,11%
Composición de metano actual	67,26%

Fuente: Autor a partir de información de (CAR, 2011)

4.2. Ubicación de la instalación

La (PTAR) El Salitre se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá, en el departamento de Cundinamarca en Colombia como se ilustra en la Figura 2, esta intercepta las aguas residuales generadas por alrededor de 3.2 millones de habitantes que residen en la cuenca del río Salitre, además de algunas industrias. Esta cuenca abarca una extensa área desde la calle 26 hasta la calle 200 y desde los cerros orientales hasta el río Bogotá, cubriendo un total de 13.964 hectáreas.

² M.S. hace referencia a la materia seca, es decir el peso total de un sólido menos el contenido de agua (INIA, 2020).

Lo anterior implica por una parte que el agua residual tiene una carga orgánica e inorgánica importante, el cual debe ser caracterizado para lograr identificar su máximo aprovechamiento y de otra parte que la capacidad del o de los digestores debe ser considerable.

La PTAR tiene como referencia una demanda eléctrica mínima para su funcionamiento entre 100.000 a 150.000 kWh al mes y una demanda máxima que oscila entre 4.356 a 4.400 MWh al mes. Esto se tiene en cuenta teniendo en consideración su operabilidad intermitente, la cual ha evidenciado una disminución de hasta el 95% en el tratamiento de las aguas residuales en momentos de menor actividad, y una operabilidad a plena capacidad que incluye el funcionamiento de las oficinas (Rodríguez L. M., 2022).

Figura 2 Ubicación geográfica del área de estudio

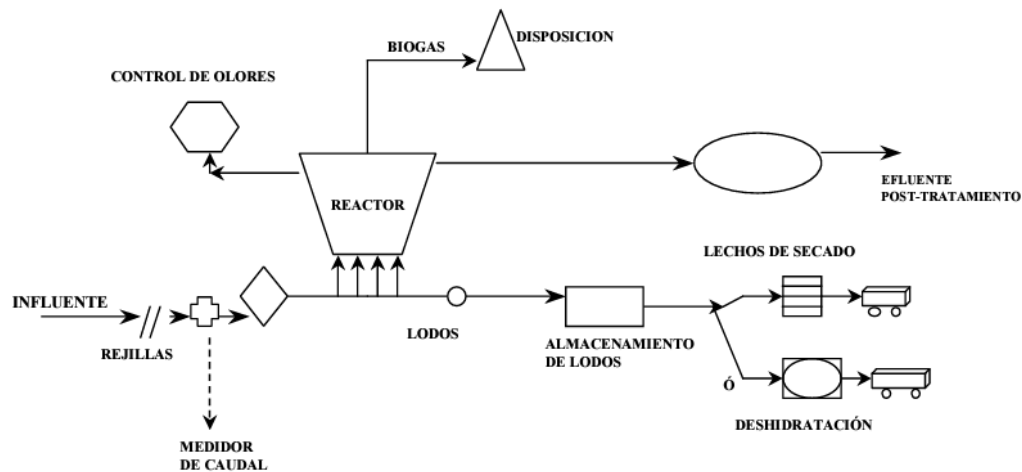


Fuente: Autor, 2023 a partir de Open Street Map y la CAR.

4.3. Normatividad colombiana aplicable

En Colombia, se encuentra el Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS), en donde en su título E, sección II hace referencia al tratamiento de aguas residuales. Allí se puede identificar los parámetros de diseño de algunos digestores anaerobios, cuyo objetivo principal es garantizar que los proyectos de este corte cumplan con los estándares de calidad, seguridad y eficiencia establecidos por la normatividad local o nacional (Mindesarrollo, 2000). En la Figura 3, se presenta el diagrama de flujo de un tratamiento anaeróbico típico, en donde se puede identificar que los lodos (primarios y secundarios) hacen parte de la entrada al digestor o reactor, y este proceso genera diferentes salidas como: I. Olores: los cuales son recolectados y controlados por medio remoción de compuestos odoríferos , II. Lodos como digestato que pueden ser utilizados como abonos agrícolas, III. Biogás para producción energética y IV. Efluentes para post tratamiento dependiendo de algún otro uso que se quiera destinar.

Figura 3 Diagrama de flujo típico en el tratamiento anaerobio



Fuente: (Mindesarrollo, 2000)

Se identifica que los tipos de digestores que recomiendan son para capacidades pequeñas como el UASB, flujo pistón y filtros anaerobios, lo que limita su uso para el diseño del presente estudio. Por ello, se toma como referencia la guía de diseño de bioingeniería de aguas residuales presentado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental ACODAL.

En el marco de la normatividad nacional, es importante hacer referencia a la resolución 635 de 2015 expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales. Es importante destacar que esta norma tendrá un impacto en los niveles permitidos de concentraciones de contaminantes por aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado, lo que incide en la caracterización del sustrato que interceptará la PTAR; en la Tabla 10, se muestran los parámetros más relevantes.

Tabla 10 Normatividad aplicable para prestadores de servicio público de alcantarillado

Parámetro	Unidades	Prestadores del servicio público de alcantarillado, con una carga mayor a 3.000,00 kg/día DBO5
pH	pH	6 - 9
DQO	mg/L O2	150
DBO5	mg/L O2	70
SST	mg/L O2	70

Fuente: Autor, 2023 a partir de la resolución 635 de 2015

5. Metodología

Una vez identificados los datos del diseño, se toma como referencia la guía de diseño de bioingeniería de aguas residuales del ACODAL y la aplicación de metodologías de estudios previos, para identificar las ecuaciones que van a dimensionar la estructura del digestor anaerobio. Entre ellas, se presenta la ecuación del volumen del digestor, el volumen del digestor corregido (considera el espacio de vaciado en donde se debe evitar la producción de espuma y que exista la zona para acumulación de biogás), el diámetro del digestor, la altura del resguardo o digestor y el caudal del gas los cuales se consolidan en la Tabla 11.

Tabla 11 Ecuaciones para la determinación de parámetros y dimensiones del digestor anaerobio

Parámetro	Ecuación
Volumen del digestor	$V_R = \tau * Q_{FM}$ <p>τ: Tiempo de retención (días)</p> <p>Q_{FM}: Caudal del lodo estabilizado</p>
Volumen del digestor corregido	$V'_R = 1,25 * V_R$
Diámetro digestor	$D_{Digestor} = \sqrt{\frac{4(V_R)}{\pi(HW)}}$ <p>Hw: Altura hidráulica del tanque</p>
Altura del resguardo	$H_{resg} = \sqrt{\frac{V'_R}{\pi\left(\frac{D_{Digestor}}{4}\right)^2}}$
Caudal del gas	$DestrucciónSSV * \left(\frac{1000m^3}{1 ton}\right)$

Fuente: Autor, 2023

6. Evaluación del recurso renovable

Complementando la información mencionada previamente, es importante identificar si los aspectos geográficos, hidrológicos, climatológicos, entre otros, permiten que la localización del digestor anaerobio sea adecuada para la obtención de energía y de cierta manera que pueda presentar potencialidad como se describe en la Tabla 12. Esto implica la favorabilidad y la viabilidad en la ejecución de dicho proyecto, además, se debe tener la certeza de que las posibles variaciones no implicaran efectos negativos en los procesos tanto del digestor como de la PTAR.

Tabla 12 Características de la localización del digestor anaerobio

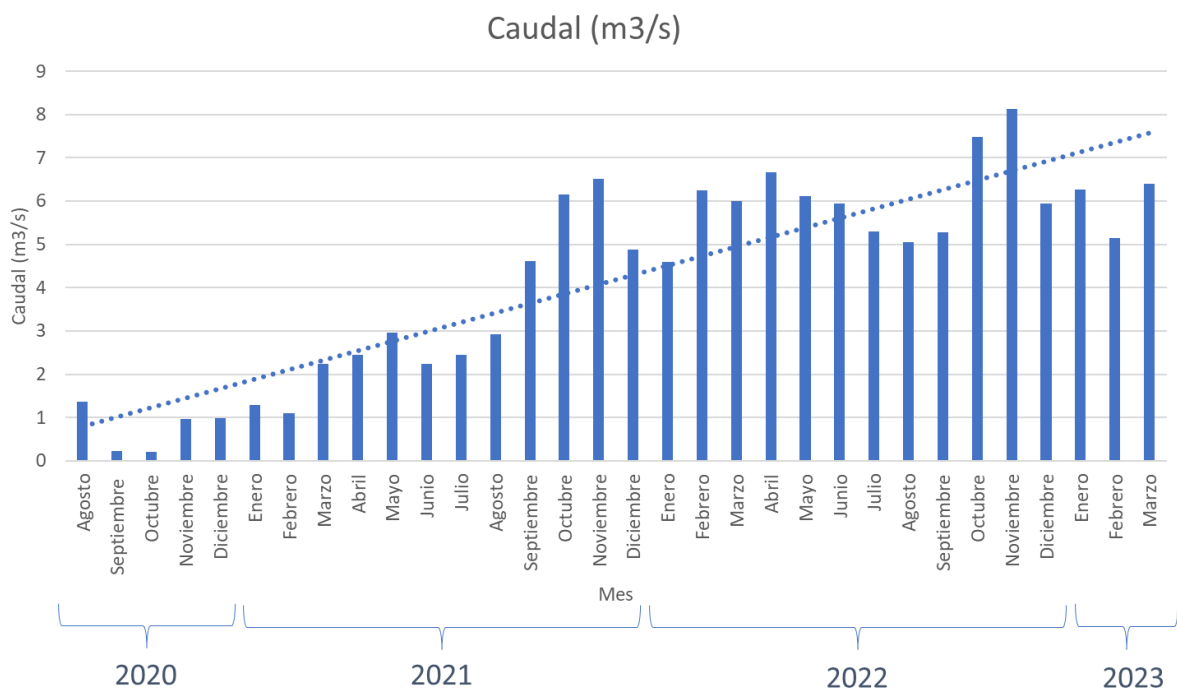
Característica	Descripción
Ubicación geográfica y clima	Bogotá tiene un clima de montaña, caracterizado por temperaturas moderadas durante todo el año. Esto puede tener ventajas en términos de control de la temperatura en los digestores, ya que las fluctuaciones de temperatura son menos extremas en comparación con áreas de climas más cálidos o fríos.
Precipitación	El promedio anual de precipitación es de 797mm. A lo largo del año, las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses de enero, febrero, julio y agosto son en su mayoría secos, las temporadas de lluvia abarcan desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre. En los meses secos al comienzo del año, se registran aproximadamente 8 días de lluvia al mes, mientras que en los meses más lluviosos puede llegar a haber alrededor de 18 días de lluvia al mes (IDEAM, 2000). Estas precipitaciones inciden en los porcentajes de humedad de los lodos.

Característica	Descripción
Disponibilidad de agua residual	Bogotá cuenta con una cantidad considerable de agua residual heterogénea, debido a los asentamientos poblacionales y al desarrollo económico por actividades industriales. Esto proporciona un sustrato constante para la digestión anaerobia y la producción de biogás.
Temperatura	La temperatura promedio se sitúa en 13.1°C. Durante el mediodía, la temperatura máxima media oscila entre 18 y 20°C, en la madrugada, la temperatura mínima se encuentra entre 8 y 10°C, aunque en la temporada seca al principio del año, las temperaturas pueden descender a menos de 5°C por las mañanas. La duración de la luz solar alcanza alrededor de 4 horas al día en los meses lluviosos, pero aumenta a 6 horas diarias durante los meses secos. La humedad relativa del aire varía durante el año entre un 77% y un 83%, siendo más elevada en los meses de abril y noviembre, y menor en julio y agosto (IDEAM, 2000). Esto implica que los procesos de deshidratación sean más complejos para estos meses.
Concentración de Materia Orgánica	Las aguas residuales típicamente contienen una cantidad significativa de materia orgánica, como residuos de alimentos y materia fecal. Esta materia orgánica es un sustrato adecuado para la digestión anaerobia, ya que los microorganismos anaerobios pueden descomponerla eficazmente en condiciones sin oxígeno, generando biogás en el proceso.
Disponibilidad de Residuos Orgánicos	Bogotá generalmente y por cultura tiene un mayor consumo de alimentos orgánicos, lo que incide en la generación de residuos orgánicos, estos serán importantes en los pretratamientos y en las fases de la digestión anaerobia.

Fuente: Autor a partir de información de (IDEAM, 2000)

En este sentido, la PTAR presenta un método de captación de las aguas residuales, en donde inicialmente el sistema de alcantarillado evita que las aguas residuales se mezclen con las aguas pluviales, ya que estas son dirigidas directamente a los humedales y al río a través de una red separada. El caudal medio mensual interceptado se encuentra en función de los aspectos mencionados previamente, como se observa en la Figura 4, a finales del año 2020 hubo un decrecimiento del caudal, posiblemente por algún fenómeno climatológico. En los años posteriores se visualiza una normalización de los caudales al ser más constantes y menos atípicos.

Figura 4 Caudal medio mensual de entrada en la PTAR El Salitre



Fuente: Autor a partir de información de (CAR, 2023)

Dicho caudal llega a una primera línea de proceso, denominada “línea de agua”, seguido de una “línea de lodos” y finalizando con la “línea de biogás”. Estas se describen a continuación:

Línea de agua, que consta de un pretratamiento de desarenado y desengrasado, una decantación primaria, un proceso biológico con aireación prolongada, una decantación

Diseño de un digestor anaeróbico para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás en la PTAR Salitre de Bogotá, Colombia
secundaria y una zona de desinfección, con una variación de caudales entre $3,6\text{m}^3/\text{s}$ y $14\text{m}^3/\text{s}$.
Diariamente se realizan análisis fisicoquímicos de parámetros como pH, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales, DQO y DBO5.

Línea de lodos (Lote de espesamiento y deshidratación de lodos): I. El lodo secundario en exceso de la etapa biológica y el lodo primario, son interceptados en mesas de lodos que tienen una capacidad de tratamiento para los secundarios, lodos en exceso y espesadores por gravedad para aumentar la concentración del lodo primario. Diariamente se realizan análisis fisicoquímicos de lodos en los parámetros de sólidos totales y sólidos volátiles. II. Se cuenta con digestores de mezcla completa y su alimentación se presenta por la mezcla de lodos (60% secundario y 40% primario); el tipo es mesófilo cuyo funcionamiento requiere temperaturas de 37°C con procesos de circulación para mantener la temperatura. La alimentación de cada digestor permite la producción de biogás con una calidad de 67,26% de metano. El lodo digerido que se produce tiene un tratamiento de deshidratación con una concentración de 27g/l que incrementa a 260g/l . Diariamente se realizan análisis fisicoquímicos de parámetros pH, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad y ácidos grasos volátiles. Es importante resaltar que actualmente no se encuentra en funcionamiento toda la línea de lodos.

Línea de biogás (Lote de estabilización de lodos y recuperación de energía): El biogás pasa al gasómetro, un tipo de almacenamiento con una capacidad de 9.000 m^3 , en donde el biogás aprovechable en la planta es de $661,407\text{ m}^3/\text{mes}$; posteriormente en el sistema de cogeneración produce energía eléctrica y calor por medio de motor. El sistema recuperador de calor es usado para mantener el calor de los biodigestores culminando así el ciclo del cogenerador, con un autoabastecimiento hasta del 40% y un ahorro estimado por tres meses de $\$2.150.000.000$ pesos colombianos (PTAR SALITRE, 2021). Actualmente se estima una producción mensual de $2.400.000\text{kWh}$ al mes.

7. Diseño de la instalación

De lo anterior se desarrolla el diseño de la instalación del digestor. Es importante mencionar que, en los espesadores, los lodos aumentan la concentración hasta un 89% pero depende de los fenómenos climatológicos y de la caracterización de lodo.

Ahora bien, tomando los datos de partida de la alimentación de digestores, de la producción total de lodo estabilizado y de la concentración de lodos espesados, se calcula el caudal del lodo estabilizado (Q_{FM}) obteniendo un valor de 3.793,33 m³/d.

$$Q_{FM} = 418.137 \frac{lb M.S}{d} \left(\frac{0,4536 kg}{1 lb} \right) = 189.666,94 \frac{kg M.S}{d}$$
$$Q_{FM} = \frac{189.666.94 \frac{kg M.S}{d}}{50 \frac{kg}{m^3}} = 3.793,33 \frac{m^3}{d}$$

Este valor se considera significativo dada la cantidad de aguas residuales que es interceptada por la PTAR. A partir de esta información se obtiene un volumen del digestor de mezcla completa de 94.833,25m³. Lo que indica que se trata de un megaproyecto.

$$V_R = \tau * Q_{FM} = 25 \text{días} * 3.793,33 \frac{m^3}{d} = 94.833,25 m^3$$

En vista de que un solo digestor no tendría la capacidad para contener dicho volumen, se considera la construcción de 10 ejemplares con capacidad de 9.483,32m³ cada uno.

$$V_R = \frac{94.833,25 m^3}{10} = 9.483,32 m^3 c/u$$

Al considerar el espacio de vaciado en donde se debe evitar la producción de espuma y que exista la zona para acumulación de biogás, se hace el cálculo de la corrección del volumen obteniendo un valor de 11.854,15m³.

$$V'_R = 1,25 * V_R = 1,25(9.483,32) = 11.854,15 m^3$$

De acuerdo al estudio 6, se puede encontrar que la propuesta era de 8 ejemplares con capacidad de 13.717,67 m³ cada uno.

A partir de acá se logra determinar el diámetro del digestor obteniendo un valor de 32,26m, tomando el valor de referencia de 14,2m de altura hidráulica. En el estudio se hace referencia de un diámetro de 33,5m.

$$D_{Digestor} = \sqrt{\frac{4(11.854,15)}{\pi(14,2)}}$$

$$D_{Digestor} = 32,26m$$

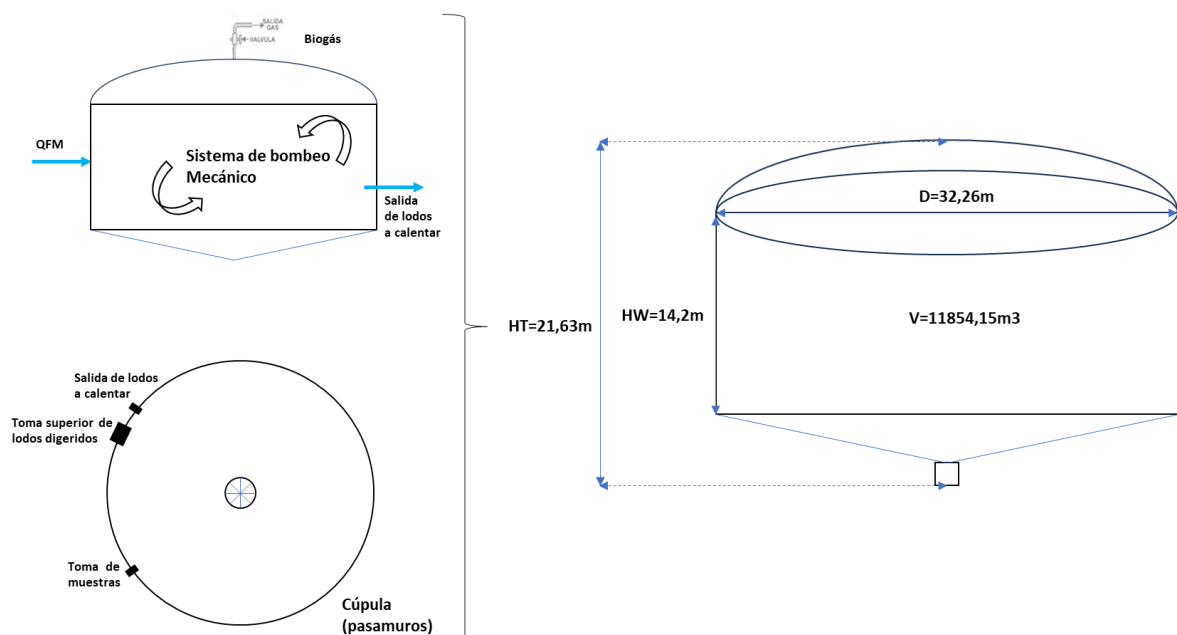
Finalmente, la altura del resguardo o altura total considerando la zona del biogás, se calcula en función del diámetro del digestor, obteniendo un valor de 21,63m

$$H_T = \sqrt{\frac{11.854,15 m^3}{\pi\left(\frac{32,26}{4}\right)}}$$

$$H_T = 21,63 m$$

Estos datos, permiten plasmar e idealizar cómo sería la estructura y el dimensionamiento del digestor anaerobio como se ilustra en la Figura 5. En la parte interna debe existir un sistema de bombeo mecánico para garantizar la transferencia de nutrientes de la actividad microbiana y maximizar la eficiencia en la producción del biogás.

Figura 5 Estructura y dimensionamiento del digestor anaerobio



Fuente: Autor, 2023 a partir de información de (CAR, 2011).

Retomando la cantidad de lodos, es importante identificar la destrucción de sólidos volátiles como parte del análisis de la cogeneración, para ello, se va a utilizar unidades en toneladas de los sólidos suspendidos totales para un mejor manejo de los cálculos; haciendo la siguiente conversión:

$$189666,94 \frac{kg M.S}{d} \left(\frac{1 ton}{1.000kg} \right) = \mathbf{189,666 tonSST/d}$$

Tomando como referencia el porcentaje de destrucción de SV de 44,1%, se obtiene una destrucción de sólidos volátiles de 83,642tonSSV/d.

$$189,666 \frac{tonSST}{d} * 44,1\% = \mathbf{83,642 \frac{tonSSV}{d}}$$

Ahora bien, considerando que 1kg de sólido volátil genera 1m³ de biogás o 1000kg (1ton) generan 1000 m³ de biogás, se obtendría un valor de caudal de gas de 3.485m³/h.

$$Q_G = \left(83,642 \frac{tonSSV}{d} \right) \left(\frac{1.000m^3}{1 ton} \right) = 83.642 \frac{m^3}{d} \left(\frac{1d}{24hrs} \right) = \mathbf{3.485 \frac{m^3}{h}}$$

En el estudio del recurso renovable, se menciona que actualmente el aprovechamiento de biogás en la planta es de 661,407m³/mes ya que no se encuentra en su total funcionamiento, es decir 0,981m³/h, apenas un 0,028% de aprovechamiento al calculado. Lo que indica que es importante la optimización y reactivación de toda la línea de lodos.

Utilizando el caudal de gas, se calcula el potencial energético y el poder calorífico, con una composición de 67,26% de metano y 32,74 de dióxido de carbono, obteniendo:

$$Volumen de metano = 3.485 \frac{m^3}{h} (0,6726) = \mathbf{2.344,01 \frac{m^3}{h}}$$

De acuerdo a los datos de partida, el poder calorífico del metano teórico se estima en 22400 kJ/m³ (Rodríguez L. M., 2022), lo que indica un valor de 52,5x10⁶kJ/h de energía de metano.

$$\text{Energía de metano} = 2.344,01 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \left(22.400 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) = 52,5 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Considerando que 1kWh es igual a 3600kJ, se obtiene un potencial energético de 14,5MWh.

$$\text{Potencial Energético} = \frac{52,5 \times 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{3.600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} = 14.584,95 \text{kWh} \left(\frac{1 \text{MW}}{1.000 \text{kWh}} \right) = 14,5 \text{MWh}$$

8. Análisis económico

Con los resultados del diseño, estructura y dimensiones del digestor anaerobio, se estima el costo total de la instalación a partir de la cuantía del proyecto PTAR del lote de estabilización de lodos y recuperación de energía, considerando la materialización de los 10 digestores anaerobios. Se consideran los costos de estabilización de lodos y recuperación de energía, costos de sistemas auxiliares, costos de operación y mantenimiento y costo total de la obra, como se muestra en la Tabla 13. Dicho valor se estima en \$80.752.159.260 COP y 18.963.278,80 €, de acuerdo a la conversión realizada a la fecha.

Tabla 13 Promedio del costo total de la instalación

Descripción	Costo (COP)	Costo (€)
Costo de estabilización de lodos y recuperación de energía	\$55.055.153.630	12.931.744,13
Costos de sistemas auxiliares	\$22.287.655.750	5.233.878,99
Costos de operación y mantenimiento	\$3.409.349.875	800.628,15
Costo total de obra, operación y mantenimiento	\$80.752.159.260	18.963.278,80

Fuente: Autor, 2023 a partir de (CAR, 2011)

Para analizar el ahorro energético, es importante comentar que actualmente la PTAR El Salitre consume electricidad de la planta de subestación “El Portugal” de la empresa ENEL y además cuenta con una planta de autoconsumo de menor escala. En este sentido, el presente análisis se centra en la capacidad que puede tener la planta de ahorrar costos energéticos derivadas de la planta El Portugal y aumentar el porcentaje de autoconsumo. Factores como las variaciones en el precio de la electricidad de la empresa ENEL son atípicas, debido a que la generación eléctrica proviene en un 63,7% de recursos hídricos que constantemente generan cambios mes a mes, en parte por la presencia de diferentes fenómenos climatológicos y el

31,5% de recursos térmicos que dependen de la oferta y demanda, costos de producción y extracción y políticas gubernamentales (Carbono Neutral, 2023). En este sentido y dada la complejidad en los precios de la electricidad, se toman datos de estudios previos para cuantificar el consumo promedio de la PTAR como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Promedio de costo y consumo eléctrico para el análisis económico

Descripción	Valor referencia	Valor anual	Costo anual (COP)	Costo anual (€)
Consumo ratio de electricidad	0,25kWh/m ³	N/A	N/A	N/A
Costo por kWh	\$665,3	N/A	N/A	N/A
Consumo eléctrico mínimo PTAR	100.000kWh (mes)	1.200.000kW	\$798.360.000	187.413,40
Consumo eléctrico máximo PTAR	4.400MWh (mes)	52.800.000kW	\$35.127.840.000	8.247.419,72

Fuente: Autor, 2023 a partir de (CAR, 2011) y (Rodríguez L. M., 2022).

Dado que el proyecto es liderado por entidades nacionales, se contempla la financiación libre de interés, ya que se presenta como instrumento de planificación para la Corporación Autónoma Regional (CAR), dichas fuentes se pueden recopilar a partir de:

- Presupuesto anual de rentas y gastos.
- Recursos propios de libre destinación y con aportes recibidos del Presupuesto General de la Nación.
- Plan de negocios para fortalecer los objetivos de desarrollo sostenible y disminuir la huella de carbono con el apoyo de ONG.

En este sentido, se presentan tres escenarios derivados de la generación de electricidad en función del porcentaje de metano. Para esto, es importante tomar los valores máximos de consumo de la PTAR y la producción de energía a partir del potencial energético.

Con el propósito de exponer cómo la eficiencia en la producción del metano varía en diferentes casos, se presentan:

- I. El primer escenario con el valor del metano actual con un valor de 67,26%.
- II. El segundo escenario más favorable, contempla un valor de 70% de metano.
- III. El tercer escenario, contempla un valor de 40% de metano.

8.1. Escenario actual 67,26% de metano

La producción energética para el escenario de 67,26% se obtiene a continuación:

$$\text{Producción de Energía} = 14,5 \text{ MWh} \left(\frac{8760 \text{ h}}{1 \text{ año}} \right) = 127.764,2 \text{ MWh/año}$$

A partir de este valor y del costo por kWh de referencia, se estima el valor total de la energía, obteniendo los valores de la Tabla 15.

Tabla 15 Promedio del costo por generación de electricidad Metano (67,26%)

Descripción	Valor por MW	Producción energía anual (MWh)	Valor (COP)	Valor (€)
Generación de electricidad	14,5	127.764,2	\$85.001.496.978	20.054.733,29

Fuente: Autor, 2023

Esto indica que, por la magnitud del proyecto, la amortización ya representa un valor a favor en el primer año de \$4.249.337.718,6 COP o 1.002.296,92 €.

8.2. Escenario 70% de metano

La producción energética para el escenario de 70% se obtiene a continuación:

$$\text{Producción de Energía} = 15,2\text{MWh} \left(\frac{8760h}{1 \text{ año}} \right) = \mathbf{132.968 \text{ MWh/año}}$$

A partir de este valor y del costo por kWh de referencia, se estima el valor total de la energía, obteniendo los valores de la Tabla 16.

Tabla 16 Promedio del costo por generación de electricidad Metano (70%)

Descripción	Valor por MW	Producción energía anual (MWh)	Valor (COP)	Valor (€)
Generación de electricidad	15.2	132.968	\$88.463.637.012	20.866.035,36

Fuente: Autor, 2023

Esto indica que, por la magnitud del proyecto, la amortización ya representa un valor a favor en el primer año de \$7.711.477.752 COP o 1.818.916,48€.

8.3. Escenario 40% de metano

La producción energética para el escenario de 40% se obtiene a continuación:

$$\text{Producción de Energía} = 8,7\text{MWh} \left(\frac{8760h}{1 \text{ año}} \right) = \mathbf{75.981\text{MWh/año}}$$

A partir de este valor y del costo por kWh de referencia, se estima el valor total de la energía, obteniendo los valores de la Tabla 17.

Tabla 17 Promedio del costo por generación de electricidad Metano (40%)

Descripción	Valor por MW	Producción energía anual (MWh)	Valor (COP)	Valor (€)
Generación de electricidad	8,7	75.981	\$50.550.566.463,6	11.925.541,41

Fuente: Autor, 2023

Esto indica que, la amortización representa un valor a favor hasta el segundo año como se muestra en la Tabla 18, lo que indica que la generación de metano representa un factor determinante en la producción de energía anual y por ende en el ahorro del funcionamiento de la PTAR.

Tabla 18 Ahorro en cada escenario de la producción de metano

Metano	Energía Anual (MWh)	Ahorro eléctrico	Ahorro primer año	Ahorro segundo año
40%	75.981,612	144%	0%	40%
67,26%	127.764,162	242%	5%	105%
70%	132.968,04	252%	9%	109%

Fuente: Autor, 2023

9. Análisis ambiental

Una vez presentado el análisis económico y su escenario de viabilidad, es importante analizar cómo el proyecto se puede presentar bajo una filosofía de sostenibilidad. Es por esto que el presente capítulo evaluará las fases del ciclo de vida del digestor anaerobio (construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento) y su impacto ambiental.

Cabe mencionar que las estructuras de los digestores de mezcla completa se construyen en material de hormigón y tienen una vida útil muy extensa, sin embargo, es importante considerar el adecuado mantenimiento de los moto-generadores que permiten la circulación de lodos, además del vaciado requerido aproximadamente cada 10 años, aumentarían su vida útil.

En este sentido, se desarrolló una matriz de impacto ambiental, la cual ponderó el impacto generado en el medio físico, biótico y antrópico y en sus elementos particulares. Dichos criterios de ponderación se basan en la importancia del impacto, la duración del impacto, la extensión del impacto, el desarrollo del impacto, la reversibilidad del impacto, el riesgo de ocurrencia y la calificación ambiental del impacto. Estas se presentan en la Tabla 19, en donde se puede visualizar el criterio, la descripción y cómo se determinó la calificación.

Tabla 19 *Criterios de ponderación de impactos ambientales*

Criterio	Descripción	Calificación
Importancia del impacto	Consecuencias en la alteración del elemento	Muy Alta: 1.0
		Alta: 0.7 - 0.9
		Mediana: 0.4 - 0.6
		Baja: 0.1 - 0.3
Duración del impacto	Existencia del impacto y consecuencias	Permanente (>5 años): 0.9 - 1.0
		Larga (1 a 5 años): 0.7 - 0.8
		Media (1 mes a 1año): 0.4 - 0.6

Criterio	Descripción	Calificación
		Corta (1día a 1 mes): 0.2 - 0.3
		Muy corta (minutos a horas): 0.1 - 0.0
Extensión del impacto	Magnitud del área afectada por el impacto	Regional: 0.8 - 1.0 Local: 0.4 - 0.7 Puntual: 0.1 - 0.3.
Desarrollo del impacto	Tiempo en el que se desarrolla el impacto	Muy Rápido (<1 semana): 0.9 - 1.0 Rápido (1 semana a 1 mes): 0.7 - 0.8 Medio (1 a 6 meses): 0.5 - 0.6 Lento (6 meses a 1año): 0.3 - 0.4 Muy Lento (>1 año): 0.1 - 0.2
Reversibilidad del impacto	Capacidad del elemento en revertir el impacto	Irreversible: 0.8 - 1.0 Parcialmente reversible: 0.3 - 0.7 Reversible: 0.1 - 0.2.
Riesgo de ocurrencia del impacto	Probabilidad de que ocurra el impacto en la ejecución de la actividad	Cierto:10 Muy probable: 7 – 9 Probable: 4 – 6 Poco probable: 2 – 3 Desconocido: 1
Calificación ambiental del impacto	Interacción de los criterios	Bajo: 0 – 3 Medio: 4 – 7 Alto: 8 - 10

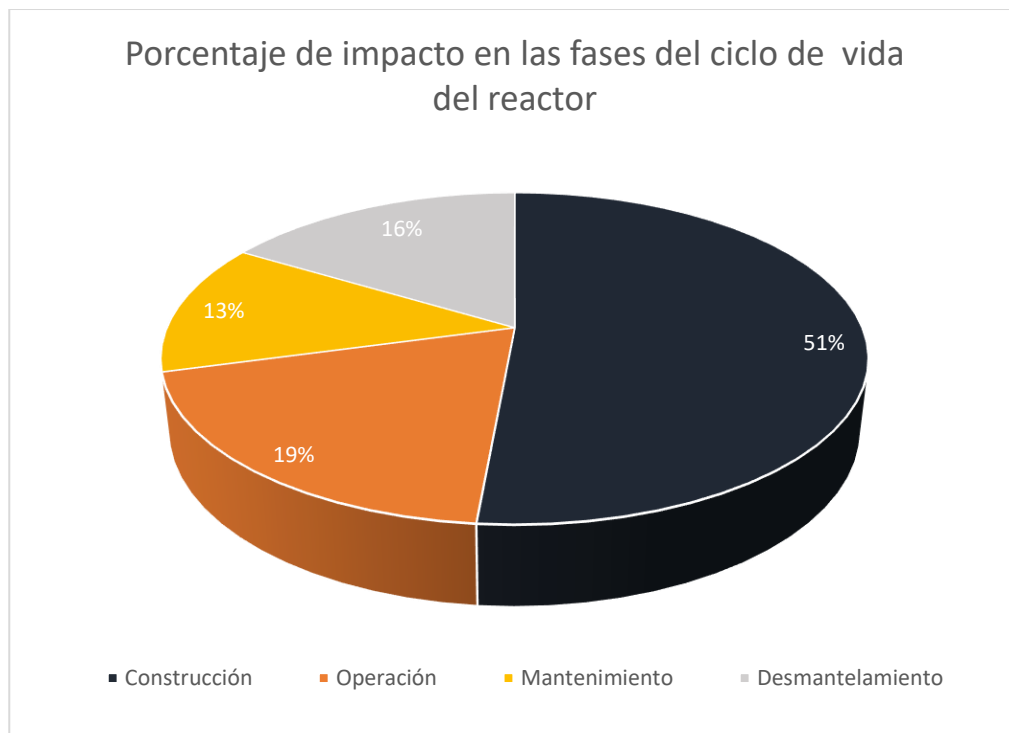
Fuente: Autor, 2023

De lo anterior se cuantificaron los criterios en la matriz de impacto ambiental, la cual se puede visualizar en el Anexo Tabla 30, y los cuales fueron calculados a través de la siguiente ecuación:

$$EA = \frac{TIPO(Importancia + Duración + Extensión + Desarrollo + Reversibilidad) * Riesgo}{5}$$

Como resultado se obtiene un mayor impacto en la etapa de construcción con un 51%, operación 19%, desmantelamiento 16% y mantenimiento 13% como se muestra en la Figura 6. Las actividades que presentaron mayores impactos, son la obtención de materiales, construcción de obras civiles y disposición de residuos.

Figura 6 Porcentaje de impacto en el ciclo de vida del digestor anaerobio



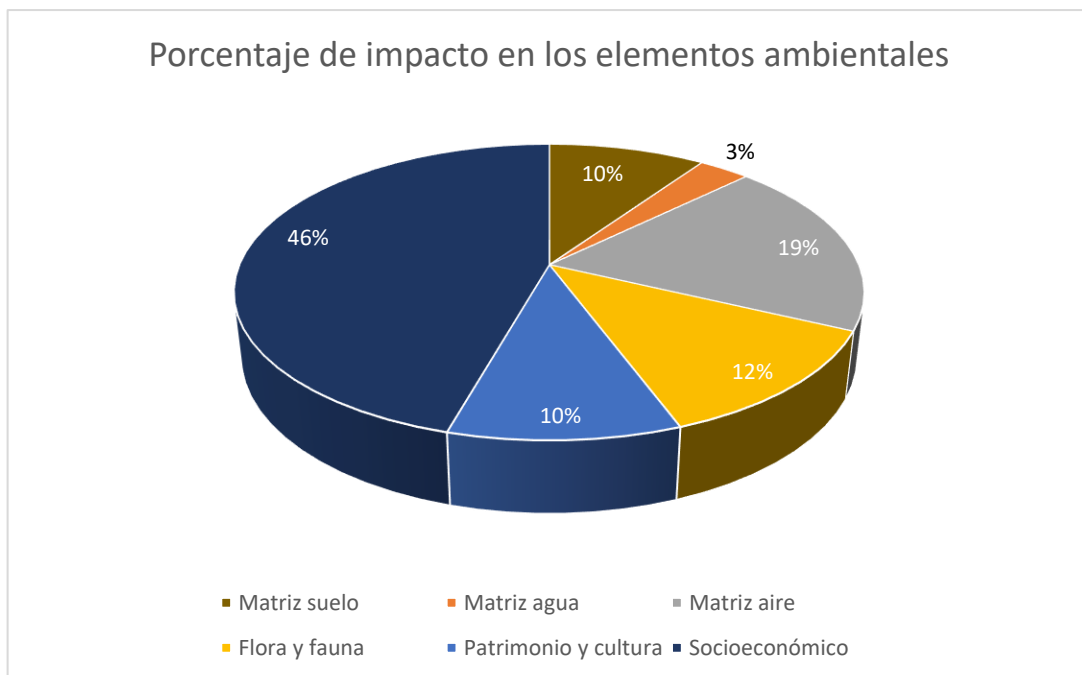
Fuente: Autor, 2023

En cuanto a los impactos sobre los elementos ambientales, se identifica un impacto positivo en el componente socioeconómico, debido a la gran oportunidad económica que se refleja por actividades requeridas en el desarrollo de la operación, mantenimiento y construcción,

sin embargo, el riesgo que representa a los trabajadores se debe considerar ya que la operación requiere de conocimiento técnico y preventivo en la gestión del riesgo.

La fauna y flora en definitiva si presentan un impacto representativo por aspectos como el cambio de uso de suelo principalmente. Estos cambios en los ecosistemas representan un desplazamiento de las especies. Lo mencionado se muestra en la Figura 7.

Figura 7 Porcentaje de impacto en el ciclo de vida del digestor anaerobio



Fuente: Autor, 2023

Una vez analizados los impactos más representativos derivados de las actividades en cada fase, se proponen algunas medidas de control y mitigación de manera general como se describen en la Tabla 20. Es de considerar que, al ser un proyecto relevante, se debe desarrollar un estudio de impacto ambiental (EIA) y además, se debe planificar la implementación y actualización de un plan de manejo ambiental (PMA) con la entidad ambiental a cargo.

Tabla 20 *Propuestas de medidas de mitigación frente a los impactos ambientales*

Impacto representativo	Propuesta de mitigación
Modificación de las propiedades físicas del suelo	Implementar buenas prácticas en el manejo del suelo para mitigar procesos de compactación y erosión, esto a través de campañas de reforestación con especies nativas ya que la ramificación permite recuperar la porosidad del suelo.
Modificación del paisajismo	Plantear una propuesta de diseño paisajístico que armonice visualmente las instalaciones, pueden tomarse ideas de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.
Emisión de ruido	Implementar estructuras que reduzcan la propagación del ruido y programas operaciones en periodos de menor actividad.
Emisión de olores	Implementar tecnologías para controlar los olores como por ejemplo con el uso de la biofiltración y barreras vegetales que mitiguen la dispersión de olores.
Alteración en la flora	Programas de reforestación nativa y plan de manejo para implementar medidas de protección. Establecer corredores verdes.
Alteración en la fauna	Implementar corredores ecológicos para permitir la movilidad de las especies, además de que la reforestación permita conservar los nichos ecológicos.
Accidentes laborales	Implementar capacitaciones de prevención y de actualización en el conocimiento técnico de los

Impacto representativo	Propuesta de mitigación
	<p>procesos. Importante la implementación del sistema de gestión y seguridad en el trabajo.</p>
Generación de residuos sólidos	<p>La disposición de residuos sólidos se debe abordar a partir de las tres R, reducir, reciclar y reutilizar. Es importante considerar el ecodiseño de la infraestructura en donde se analice a profundidad qué tipo de materiales en definitiva pueden pertenecer a la dinámica de la economía circular y permitir otro uso sin fomentar la generación de puntos críticos de residuos sólidos.</p>

Fuente: Autor, 2023.

10. Resultados

A partir del desarrollo de los capítulos previos, se realizó el diseño de un digestor anaerobio para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás, a través de información proyectada al año 2040, además, se analizó el funcionamiento técnico que debe considerar la instalación, encontrando importante la determinación del análisis elemental e inmediato para obtener el poder calorífico real y la optimización en los procesos para la producción de metano. De lo anterior, se identifica la ausencia del análisis elemental en la PTAR, lo que limita la cuantificación del poder calorífico y la relación C:N para analizar a un mejor detalle la eficiencia del sistema. En la Tabla 21, se presentan los primeros resultados de los parámetros estudiados en el diseño de la instalación.

Tabla 21 Resultados del caudal, volumen y dimensiones del diseño del digestor anaerobio

Parámetro	Resultado
Caudal de lodo estabilizado	3.793,33 m³/d
Volumen total	94.833,25 m³
Volumen de cada digestor	9.483,32 m³
Volumen corregido de cada digestor (10)	11.854,15 m³
Diámetro	32,26m
Altura	21,63 m

Fuente: Autor, 2023

Inicialmente se obtiene el caudal del lodo estabilizado, es importante mencionar que la comparación de este dato es difícil de realizar dada la particularidad de las aguas residuales, los aspectos geográficos, la cantidad de población que incide en ellas, la ausencia de

información, entre otros para cada localización. Sin embargo, este valor se considera relevante ya que debería interceptar $3.793,33 \text{ m}^3/\text{d}$.

De lo anterior, se obtiene un volumen del digestor de $94.833,25 \text{ m}^3$, como es de esperarse es una cifra bastante alta. Por ello se proponen 10 digestores homogéneos que permitan descomponer de forma efectiva la materia orgánica en un tiempo de retención de 25 días y en temperaturas mesofílicas de 35°C , además de calcular el valor del volumen corregido, para considerar el espacio de acumulación del biogás. En este punto si es posible referenciar el valor del estudio 6 para la misma localización en donde indican la construcción de 8 digestores con un volumen de $13.717,67 \text{ m}^3$ cada uno.

En las dimensiones del digestor, es importante garantizar una mezcla efectiva que incida en la eficiencia del sistema anaeróbico, además, que permita considerar la carga superficial para evitar problemas de sedimentación y acumulación, esto debido a que las propiedades físicas del lodo como lo son la viscosidad o la capacidad para formar costras suponen un problema operativo. Estos parámetros influyen en los costos de construcción y mantenimiento, por la cantidad de material requerido; al comparar los datos con el estudio 6, se puede ver que los valores se encuentran en un rango similar con valores de 33,50m de diámetro y 15m de altura.

Continuando con la segunda parte del diseño del digestor como se visualiza en la Tabla 22, encontramos los valores de destrucción de SSV y la producción energética que dependen de los parámetros anteriores. Inicialmente se determinó la cantidad de sólidos suspendidos totales por día, con un valor de $189,666 \text{ tonSST}/\text{d}$, en donde al tomar como referencia el 44,1% de destrucción de sólidos volátiles se obtienen $83,642 \text{ tonSSV}/\text{d}$, equiparables con la reducción de carga orgánica del efluente tratado. Este valor es importante para determinar el caudal del gas, el cual permite monitorear y controlar el proceso anaerobio y sus variaciones, al inferir en los cambios que se pueden presentar en la carga orgánica, problemas operativos, concentración de metano o cambios en las condiciones del digestor. Cabe mencionar que este proceso permite reducir la emisión de GEI.

En cuanto a la concentración o porcentaje de metano, este permite identificar la capacidad del sistema de producir energía eléctrica o calor de una manera más eficiente. Tomando como referencia 67,26% de metano, se obtendría una producción energética de 14,5MWh. Actualmente se estima un potencial de 10,5 MWh al 2025 (CAR, 2011), lo que genera aproximadamente un incremento del 38% de producción de energía al 2040.

Es importante resaltar que en la determinación de la energía que produce el metano, se utilizó el poder calorífico teórico estimado en 22400 kJ/m^3 , sin embargo, es importante contar con un laboratorio en donde se puedan determinar los parámetros necesarios para realizar el análisis elemental e inmediato y establecer análisis reales del poder calorífico y puedan ser comparados con los teóricos, como sucede en el estudio 5.

Tabla 22 Resultados de la destrucción de SSV y producción energética

Parámetro	Resultado
Sólidos suspendidos totales	$189,666 \frac{\text{tonSST}}{d}$
Destrucción de sólidos volátiles (44,1%)	$83,642 \frac{\text{tonSSV}}{d}$
Caudal de gas	$3.485 \frac{m^3}{h}$
Volumen de metano	$2.344,01 \frac{m^3}{h}$
Energía	$14,5MWh$

Fuente: Autor, 2023

10.1.Resultado del componente económico

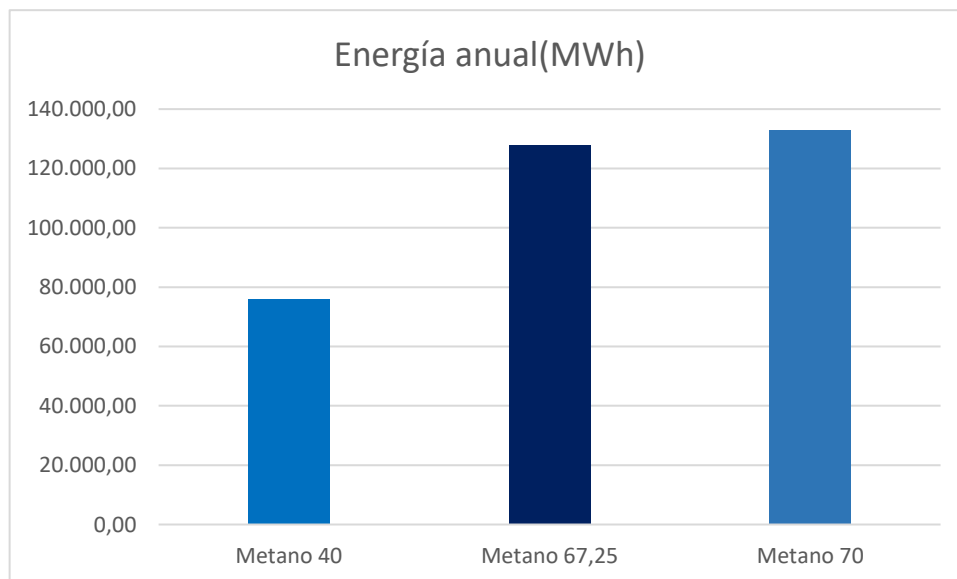
En este sentido, se obtuvo la cuantificación del componente económico, derivado de la propuesta de construcción de los 10 digestores de mezcla completa, en material de hormigón e incluida la operación y mantenimiento, estimado en un valor de \$80.752.159.260 pesos colombianos y 18.963.278,80 €.

Dependiendo de la eficiencia en la producción de metano, el ahorro y producción energética presentaría una variación como se muestra en la Tabla 23. De acuerdo a la información primaria recopilada en la PTAR, se tiene conocimiento que dichas estructuras tienen larga vida útil, solo se debe considerar el mantenimiento general de lavado a los digestores cada 10 años,

para aumentar su funcionamiento. Como resultado se identifica que los tres escenarios son viables, pero generan diferencias importantes, ya que la energía anual que produce el escenario de metano del 40% representa el 57% del escenario con el 70% de metano.

Tabla 23 Resultados del componente económico para el diseño del digestor anaerobio

Porcentaje de metano (%)	Generación electricidad anual (MWh)	Tiempo para recuperar inversión (años)	Ahorro eléctrico
40	8,6	1	144%
67,26	14,5	0	242%
70	15,2	0	252%



Fuente: Autor, 2023

10.2. Resultado del componente socioambiental

En cuanto al impacto ambiental por la materialización de estos digestores, se encontró que el 51% de los impactos se generan en la fase de construcción, 19% en la operación, 13% en el mantenimiento y 16% en el desmantelamiento. Lo que genera relevancia al momento de planificar el proyecto con instrumentos como Estudio de Impacto Ambiental.

En relación con los efectos en los componentes ambientales, se observa un impacto positivo en la dimensión socioeconómica, ya que se genera una significativa oportunidad económica a través de actividades necesarias para la operación, mantenimiento y construcción con un 46%. No obstante, es esencial considerar el riesgo para los trabajadores, ya que la ejecución de estas tareas demanda un conocimiento técnico y enfoque preventivo en la gestión de riesgos.

Por otro lado, la fauna y la flora experimentan un impacto considerable con el 12%, especialmente por el cambio en el uso del suelo con el 10%. Estos cambios en los ecosistemas conllevan al desplazamiento de especies, lo que afecta directamente a la biodiversidad, además de generar emisiones de GEI y material particulado PM con el 19% e impactos en el componente patrimonial o cultural con el 10%. Se identifican bajos impactos en la matriz agua con el 3%.

De lo anterior, es importante considerar:

- Que se promueva la mitigación ante los impactos ambientales y socioeconómicos como se menciona en el capítulo del análisis ambiental.
- Que se garantice el monitoreo y seguimiento en el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.
- La optimización en procesos como en la generación de residuos sólidos.
- La participación comunitaria para fomentar la aceptación de los proyectos de construcción de digestores.
- Que el plan de manejo integral permitirá generar sostenibilidad al ciclo de vida de los digestores.

10.3.Comparación con estudios analizados

De lo anterior, se logró realizar la siguiente comparación con los estudios mencionados en el apartado del estado del arte:

De acuerdo a la revisión del alcance de las opciones para aumentar la producción del biogás a partir de lodos de depuradora: Desafíos y oportunidades para mejorar autosuficiencia energética en PTAR se encontró principalmente lo mencionado en la Tabla 24.

Tabla 24 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 1

Resultados presente estudio	Estudio 1
Se identifica que la optimización de parámetros influye con la co-digestión o mezcla de lodo primario y secundario, estos inciden en la obtención porcentual de metano.	Optimización de los parámetros como la co-digestión para mejorar la obtención de energía.

Fuente: Autor, 2023

En el análisis experimental y de simulación de la producción de biogás a partir de lodos de aguas residuales de bebidas para la generación eléctrica, se encontró principalmente que, aunque hay información muy similar, hay mayor potencial eléctrico en el presente estudio, puede deberse al entorno de los microorganismos y el pH como se describe en la Tabla 25.

Tabla 25 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 2

Resultados presente estudio	Estudio 2
pH: 7,33	pH: 8,5
T: 35°C	T: 35°C
Carga orgánica: No hay datos	Carga orgánica 1:3

Resultados presente estudio	Estudio 2
RH: 25 días	RH: 24 días
Potencial eléctrico: 14,5MWh	Potencial eléctrico: 18,9kWh * 10 digestores*12 meses= 2,26MWh

Fuente: Autor, 2023

En el diseño de un digestor anaerobio para co-digestión de fangos de depuración y residuos líquidos de la industria alimentaria, se obtuvo principalmente que la capacidad de la PTAR es considerable, lo que justifica las dimensiones obtenidas como se menciona en la Tabla 26.

Tabla 26 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 3

Resultados presente estudio	Estudio 3
Volumen del digestor: 9.483,32 m ³	Volumen del digestor: 3.000 m ³
RH: 25 días	RH: 20 días
Capacidad: 3.973,33m ³ /día	Capacidad: 120m ³ /día
Diámetro: 32,26m	Diámetro: 24,8m
Altura: 21,63m	Altura: 6,20m
Potencial eléctrico: 14,5MWh	Potencial eléctrico: 180kWh

Fuente: Autor, 2023

En el diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano, se encontró principalmente la descripción de la Tabla 27.

Tabla 27 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 4

Resultados presente estudio	Estudio 4
Al aumentar la calidad del metano se identificó un incremento en la producción de energía. De un porcentaje del 40% de metano al 70% hay un incremento del 56,5% de energía.	Necesidad de aumentar la calidad del metano para poder producir energía ya que se requiere entre un rango de generación de metano de 55 a 75%.

Fuente: Autor, 2023

En la evaluación del potencial de las fuentes de energía renovables en un tratamiento con digestor de manta de lodos anaeróbico de flujo ascendente a gran escala en aguas residuales de Ghana, se obtuvo principalmente lo mencionado en la Tabla 28.

Tabla 28 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 5

Resultados presente estudio	Estudio 5
Para el 70% de metano se estima un potencial energético de 132.968,04MWh anual y un caudal de biogás de 2.344 m ³ /h equivalente a 56.256Nm ³ /día. Se puede inferir en las propiedades del recurso o la optimización en sus procesos mejoran los resultados.	Porcentaje máximo de 76,5% y mínimo de 54% de metano, potencial neto de recuperación de 534,1 MWh/año y flujo de biogás de 611Nm ³ /día.
Se evidencia la necesidad de contar con información del poder calorífico para identificar la forma de aumentar la eficiencia.	Con la aplicación del análisis elemental e inmediato lograron comparar el poder calorífico con datos actuales y teóricos.

Fuente: Autor, 2023

En la evaluación técnica del tratamiento y manejo de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (PTAR SALITRE) Fase II Bogotá D.C. – Colombia, se realizó la comparación de acuerdo a los datos disponibles, encontrando lo mencionado en la Tabla 29.

Tabla 29 Resultados y comparación con el estado del arte: Estudio 6

Resultados presente estudio	Estudio 6
Uso de 10 digestores	Uso de 8 digestores
Diámetro de 32,26 m	Diámetro de 33,50 m
Altura cilíndrica útil de 14,2 m y una altura cilíndrica total de 21,63 m	Altura cilíndrica útil de 14,50 m y una altura cilíndrica total de 15,00 m
El volumen útil por cada digestor estimado en 11.854,15 m ³ .	El volumen útil por cada digestor estimado en 13.717,67 m ³ .

Fuente: Autor, 2023

10.4.Recomendaciones

En este proceso se identificaron algunos limitantes, lo que permite proponer las siguientes recomendaciones:

- Implementar en las instalaciones de la PTAR un laboratorio que se encargue de realizar los análisis elementales del sustrato, esto con el fin de conocer los valores de la relación C/N y del poder calorífico.
- Generar un seguimiento de las concentraciones de H₂S y valorar en qué fase se está generando dicho aumento, ya que su reducción permite aumentar el porcentaje de metano.
- Implementar el diseño de digestores de mezcla completa en normas como la RAS, ya que esto permite inferir con mayor exactitud en algunos resultados como porcentajes de remoción o datos en las dimensiones del digestor.
- Permanecer actualizado sobre avances tecnológicos y de investigación en la digestión anaerobia, esto permite identificar oportunidades de mejora continua.

- Una de las limitaciones es la heterogeneidad de la información disponible, lo que genera cierta incertidumbre de la validez en los datos.
- Finalmente se identificó como limitante la cualificación y balance de los GEI que se pueden mitigar con el funcionamiento de los digestores, ya que los datos presentarían un dinamismo continuo que genera un mayor porcentaje de incertidumbre.

De acuerdo a estas recomendaciones, se considera importante contemplar líneas de trabajo futuras como la optimización de los procesos, ya que más allá de generar y cuantificar datos y valores de diseño en digestores es importante generar eficiencia, ya que eso incide en los costos asociados que como se evidenció en el análisis económico puede representar diferencias hasta de 16 años.

11. Conclusiones

En el desarrollo del presente estudio, se llevó a cabo la elaboración del diseño de un digestor anaerobio como parte de la solución frente a la problemática plasmada anteriormente, la cual mencionaba el constante crecimiento de la población, la necesidad de tratar patógenos presentes en los lodos y el desperdicio de lodos ricos en nutrientes que pueden servir como un recurso valioso en la producción de energía. Dicho diseño se formuló tomando como referencia datos proyectados al año 2040, asimismo, se analizó el funcionamiento técnico que la instalación deberá tener para optimizar la producción de energía.

En este sentido, se presentan las conclusiones en relación a los objetivos planteados y a la hipótesis propuesta, como se menciona a continuación:

- Se realizó el diseño de un digestor anaerobio para el aprovechamiento de lodos y producción energética en la PTAR Salitre, encontrando que se cuenta con un caudal de alimentación considerable ya que proviene de las aguas residuales de alrededor de 3.200.000 habitantes y algunas industrias; dicho volumen es de 94.833 m³ lo que representarían 10 modelos de digestores de mezcla completa con capacidad de 9.483 m³ cada uno y un potencial eléctrico de 14,5MWh.
- Se recopiló información teórica relevante para la toma de decisiones en estudios de diseño y optimización de digestores anaerobios, los cuales incluyen aspectos como la clasificación del sustrato, las técnicas utilizadas para su caracterización, la necesidad de generar un control en los parámetros de control, técnicas de pretratamiento aptas para aumentar eficiencia en las fases que se producen en la digestión anaerobia, y la producción de biocombustible como el biogás y producción de energía.
- De lo anterior se analizó el funcionamiento técnico de la instalación anaeróbica que depende de fases como la recepción de aguas residuales, composición volumétrica de sólidos suspendidos y disueltos, optimización de parámetros para la digestión y pretratamientos que permiten disminuir impurezas como el ácido sulfhídrico H₂S, elemento considerado limitante para la eficiencia de la PTAR El salitre.
- De acuerdo a la demanda eléctrica de todo el funcionamiento de la PTAR, se identifica que es muy variable y atípica, si tomamos como referencia el consumo máximo de 52.800MWh anual, la contribución de los digestores sería representativa con un valor

de 127.764MWh anual. Cabe mencionar que actualmente se genera 28.800MWh al año en la PTAR, lo que aumentaría un 343% al año 2040.

- La evaluación de los impactos ambientales, demostró, por una parte, que para la fase de construcción se genera un mayor impacto con el 51%, debido a la remoción de la cobertura vegetal, el desplazamiento de la biodiversidad y las emisiones de GEI en algunos procesos por la generación de residuos sólidos. De otra parte, se identificó que se genera un mayor impacto en el componente socioeconómico con el 46%, ya que genera empleabilidad y un mejor desarrollo económico principalmente por las fases de operación y mantenimiento.
- Se realizó la comparación de algunos estudios que se fundamentan en la misma temática, encontrando de forma general que se presenta un buen potencial energético y unas dimensiones acordes a las características del caudal de entrada.
- Como recomendación fundamental, es importante poder cuantificar el análisis elemental para poder identificar la incidencia de la relación C:N y del poder calorífico en sus resultados finales y así lograr generar una mejora continua en la eficiencia del digestor.

Finalmente, y contestando a la pregunta planteada en la hipótesis, la respuesta es que, al optimizar la producción energética por el aumento en el porcentaje de metano, se evidencia que para un escenario de 40% de metano hay una recuperación de la inversión en el segundo año, una producción de 75.981MWh anual y un ahorro del 144%, para el caso del escenario del 67,26% metano, hay una recuperación de la inversión en el primer año, una producción de 127.764MWh anual y un ahorro de 242% y por último para el caso del escenario del 70% metano, hay una recuperación de la inversión en el primer año, una producción de 132.968MWh anual y un ahorro de 252%. Su materialización permitirá tener en gran medida un impacto positivo para las fases de operación y mantenimiento, cabe resaltar que es importante la implementación del sistema de gestión y seguridad en el trabajo.

12. Referencias bibliográficas

- Acosta, L., Obaya, A., & Ma, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)*, 35-48.
- Adantey Arthur, P. (2023). Evaluating the Potential of Renewable Energy Sources in a Full-Scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Treating Municipal Wastewater in Ghana. *Sustainability*, 15, 3743.
- Admasu, A. (2022). *Experimental and simulation analysis of biogas production from beverage wastewater sludge for electricity generation*. scientific reports.
- Arroyo , M., & Patricia. (2015). *Tecnologías comerciales de hidrólisis térmica de lodos de depuradora: Revisión documental y comparativa*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Bennardi, O. (2021). *Digestión anaeróbica: Obtención de biogás* .
- CAR. (2011). *Producto Final – Anexo No. 10 Digestión de Lodos y Cogeneración*. Bogotá.
- CAR. (2021). *AVANCE DE EJECUCIÓN DE OBRA*. Bogotá: PTAR SALITRE .
- CAR. (2021). *Boletín N° 55 de la PTAR SALITRE* . Bogotá .
- CAR. (2023). *PTAR SALITRE*. Obtenido de <https://ptarsalitre.com.co/#ptarsalitre>
- Carbono Neutral. (9 de Mayo de 2023). *Las dos caras de las hidroeléctricas en Colombia*. Obtenido de <https://opepa.org/camino-hacia-carbono-neutral/noticias/las-dos-caras-de-las-hidroelectricas-en-colombia/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20datos%20de%20ENEL%2C%20E2%80%9Cla,carb%C3%B3n%2C%20fueloil%20y%20combust%C3%B3leo%2%80%9D>.
- Castellano, D. (2022). *Modelamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre mediante el software WEST*. Bogotá Colombia: Universidad de los Andes.
- Chiva Vicent, S. (2018). *Depuración de aguas residuales: Digestión anaerobia*. Universidad Jaume.

COLPRENSA. (02 de 05 de 2022). *El 47 % de las aguas residuales no son tratadas en Colombia*.

Obtenido de <https://www.radionacional.co/actualidad/medio-ambiente/aguas-residuales-en-colombia-47-por-ciento-no-son-tratadas>

Energética . (25 de febrero de 2022). *Energética 21* . Obtenido de El uso del biogás como combustible renovable en motores de cogeneración: <https://energetica21.com/articulos-y-entrevistas-online-ver/el-uso-del-biogas-como-combustible-renovable-en-motores-de-cogeneracion>

FAO. (2011). *Manual de Biogás* . Chile.

Gómez, G. M. (2022). *Evaluación técnica del tratamiento y manejo de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales el salitre (ptar salitre) fase ii bogotá d.c. – colombia*. Bogotá : Universidad Católica .

Gutiérrez, C., Quispe, A., Romero, R., Villafuerte, P., Ramos, J., Aguilar, J., & Canqui, B. (2021). Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 81-91.

Guzzo, D. L. (2016). *Diseño de un digestor de fango anaerobio con producción de biogás. Estudio de cogeneración*. España: Escuela técnica superior de ingenieros industriales de Valencia.

IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores Anaerobios*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía .

IDEAM. (2000). *Características climatológicas de las ciudades en Colombia*. Colombia.

INIA. (2020). *Determinación de la materia seca*. Uruguay: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria .

Lima, D. (2023). *A Scoping Review of Options for Increasing Biogas Production from Sewage Sludge: Challenges and Opportunities for Enhancing Energy Self-Sufficiency in Wastewater Treatment Plants*. Attilio Converti.

Loaiza, J. E. (2009). La problemática del agua y el tratamiento de aguas residuales industriales. *Revista Virtual Pro, Bogotá, Colombia*, ISSN 1900-6241 No 86.

- Mañuga, T., Rodríguez, J., & Torres, P. (2012). Tratamiento de agua residual doméstica sin clarificación primaria en un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto. *Ingeniería y desarrollo*, Volumen 30 N° 2.
- Mindesarrollo. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS*. Colombia.
- Morales, G., Sandoval, L., Ramírez, E., Gasca, S., Navarro, J., Hernández, N., . . . Calderón, C. (2017). *Energía limpia del agua sucia: Aprovechamiento de lodos residuales*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Nogués, S. (2017). *Energía de la Biomasa (Energías Renovables)*. Zaragoza: Prensas de la universidad de Zaragoza.
- Osorio, J., Ciro, H., & González, H. (2007). *Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío*. Medellín Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pelegrín, C. (2022). *Diseño de un digestor anaerobio para codigestión de fangos de depuración y residuos líquidos de la industria alimentaria, con capacidad para tratar hasta 120 m³/d.* . Valencia : Escuela Técnica Superior Ingeniería Industrial Valencia .
- Pintado, L. N. (2017). *Modelamiento y control de proceso de digestión para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales* . Perú: Universidad de Piura.
- PTAR SALITRE. (2021). *Avance de obra de la PTAR El Salitre* . Obtenido de <https://ptarsalitre.com.co/avanceobra/>
- Rajput, V., Yadav, A., Jatav, H., Singh, S., & Minkina, T. (2022). *Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge*.
- Ramón, V. L. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales . *Quivera*, vol. 12, núm. 2, pp. 58-69.
- Rodríguez, I. R. (2019). *Análisis de ciclo de vida de la energía eléctrica generada a partir de biomasa residual de origen urbano* . méxico: universidad nacional autónoma de méxico .
- Rodríguez, L. M. (2022). *Análisis de la generación energética a partir del biogás obtenido en la Planta de Tratamiento de Agua El Salitre (Bogotá)*. Universidad de Barcelona.

SENER. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. México: Programa EnRes.

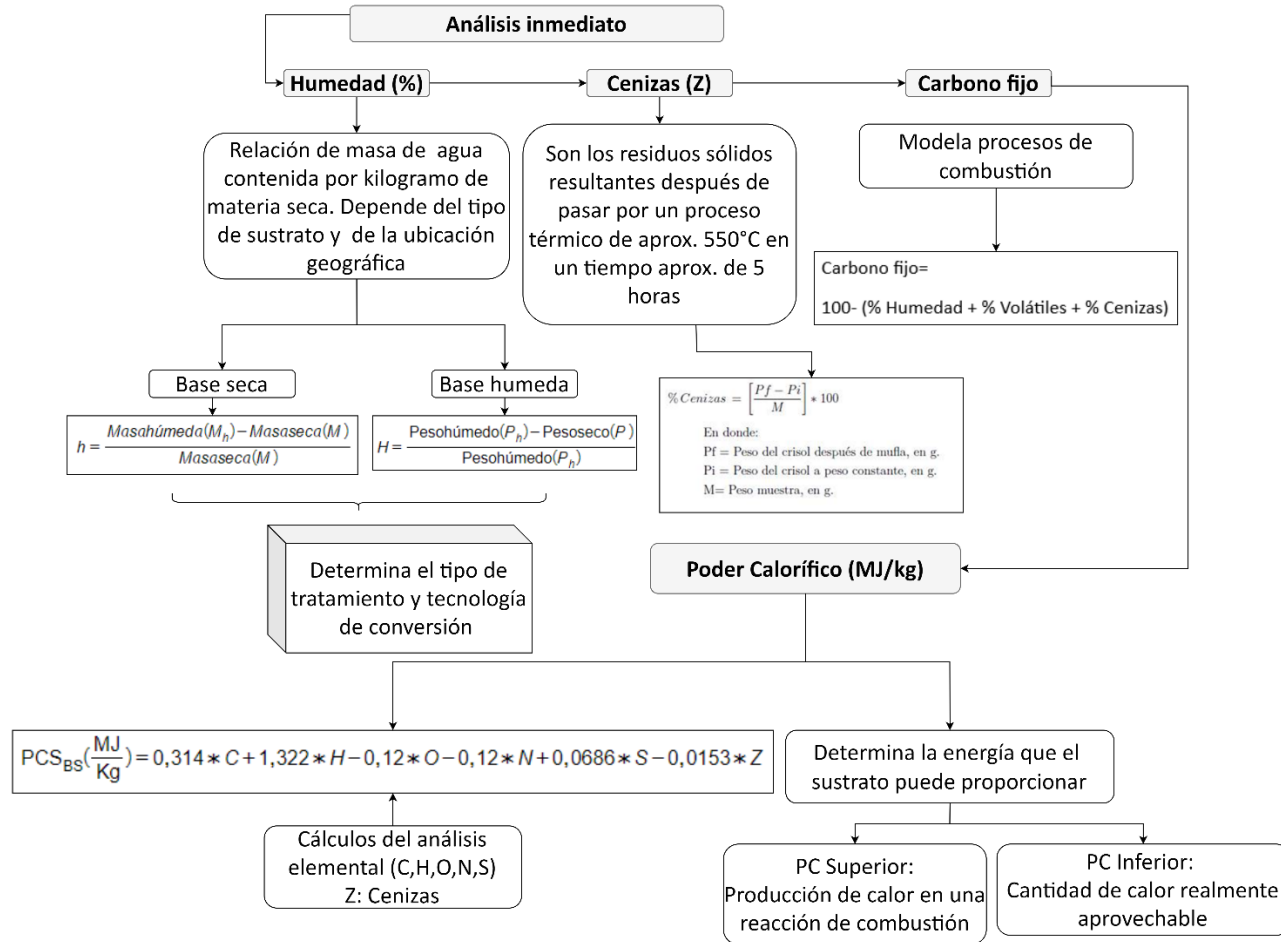
UNESCO. (2017). *Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura: Programa municipal de evaluación de los recursos hídricos .

Vasquez, J. P. (2018). *Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento de aguas residuales municipio de funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo*. . Bogotá: Universidad Católica.

WaterAid. (2020). *El intratable problema de las aguas residuales*. Colombia : ONG.

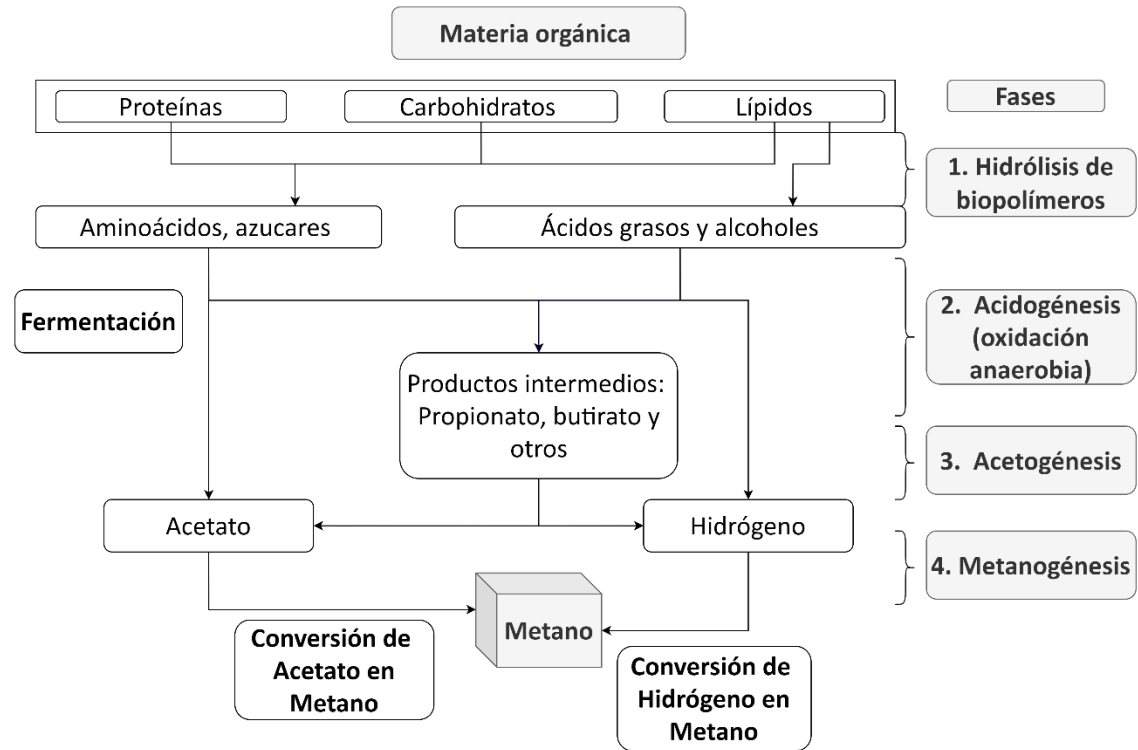
13. Anexos

Figura 8 Análisis inmediato del sustrato



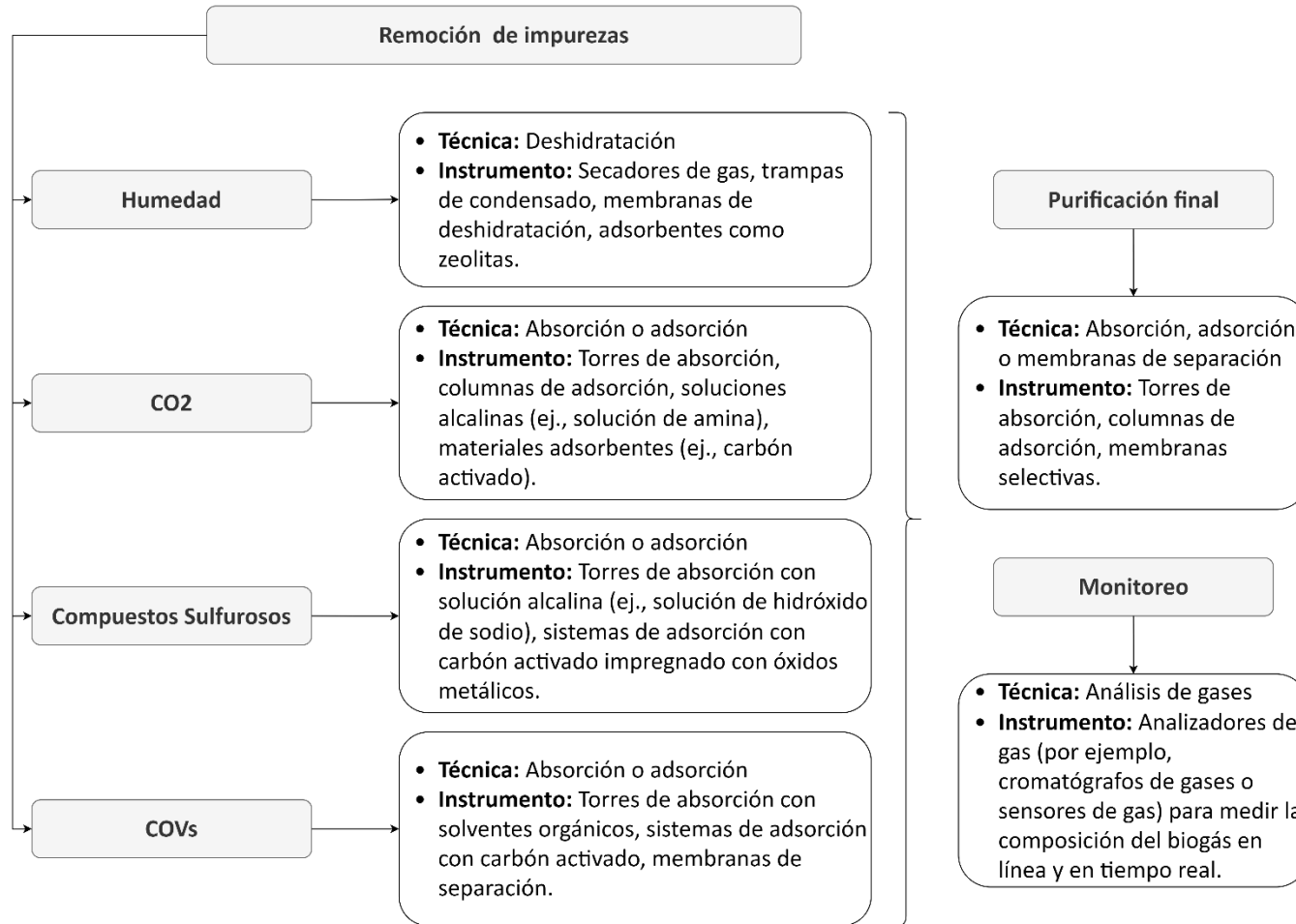
Fuente: Autor, 2023 a partir de (Nogués, 2017)

Figura 9 Fases de la digestión anaeróbica



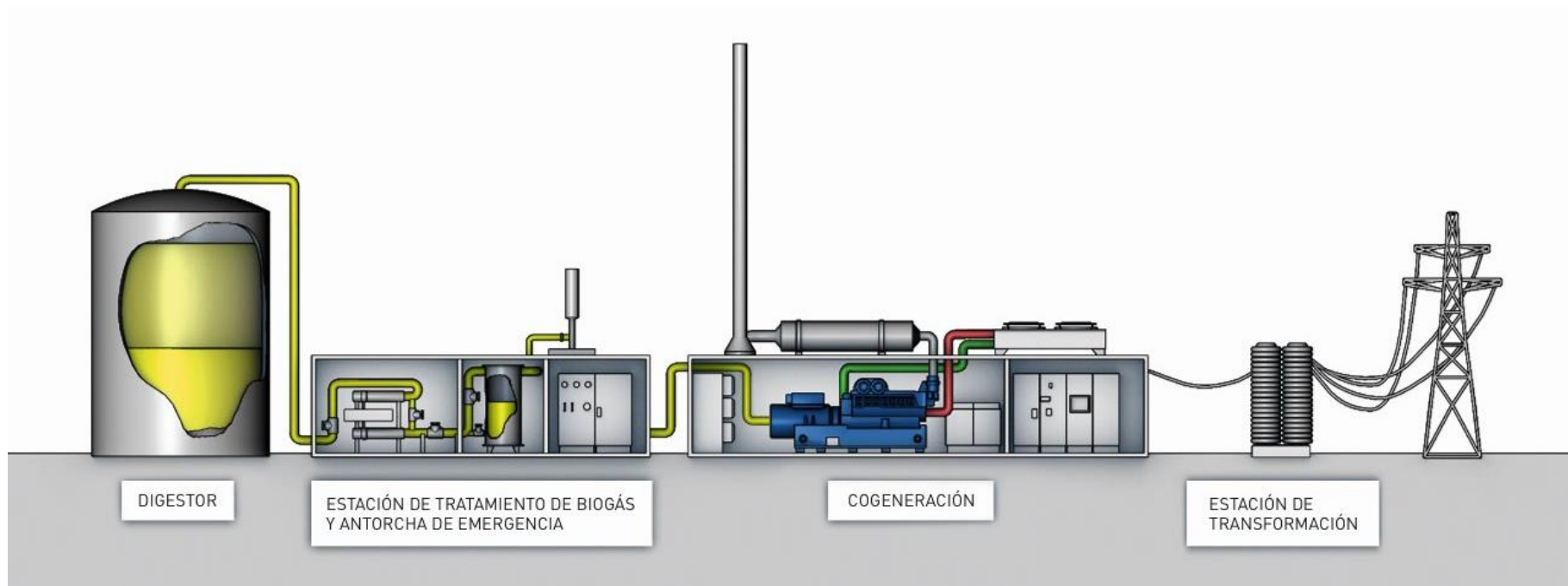
Fuente: Autor, 2023 a partir de (SENER, 2017)

Figura 10 Técnicas e instrumentos para la remoción de impurezas en el biogás



Fuente: Autor, 2023

Figura 11 Estructura funcional del digester anaerobio, cogeneración y producción de energía



Fuente: (Energética , 2022)

Figura 12 Enfoques de investigación Estudio 1

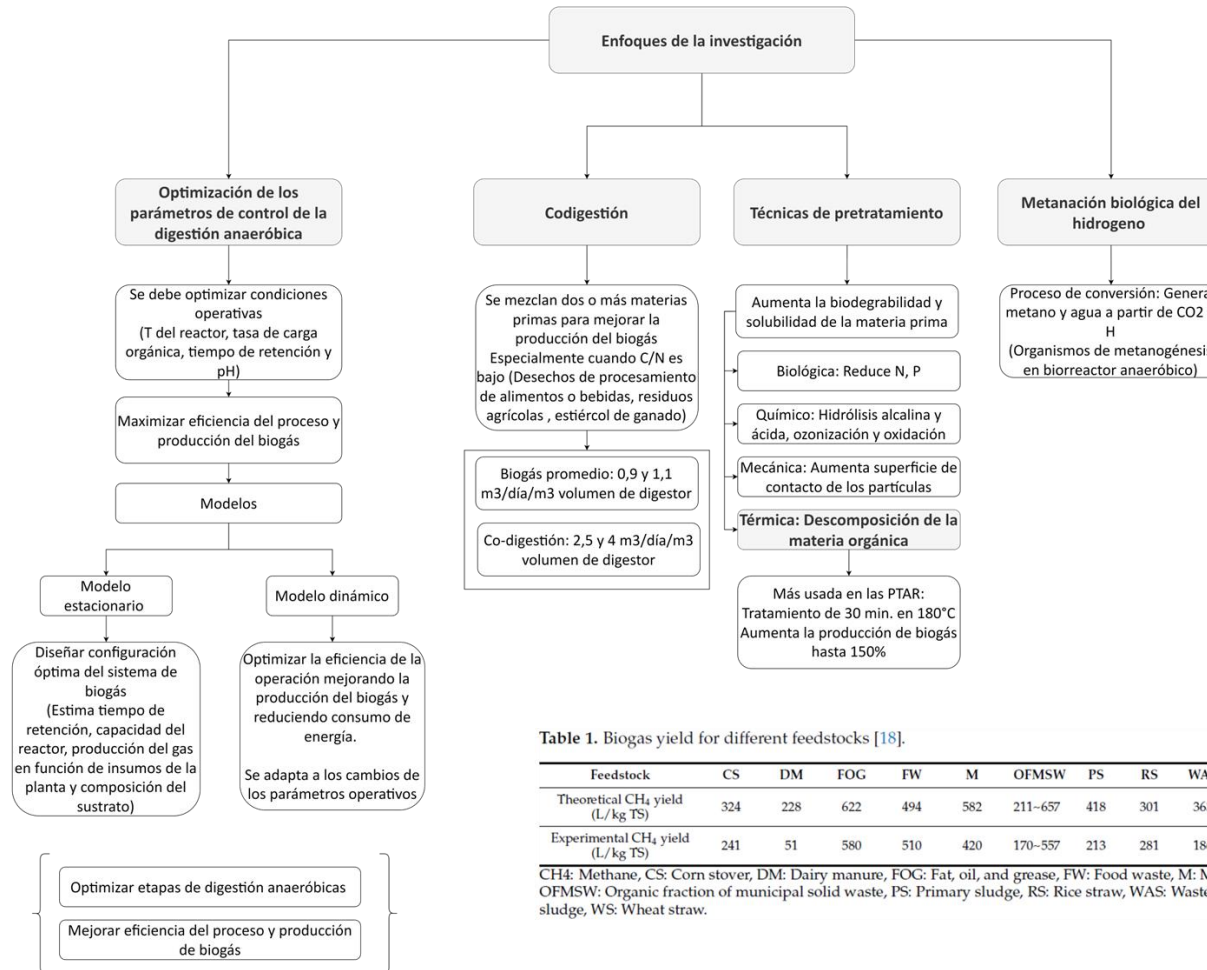


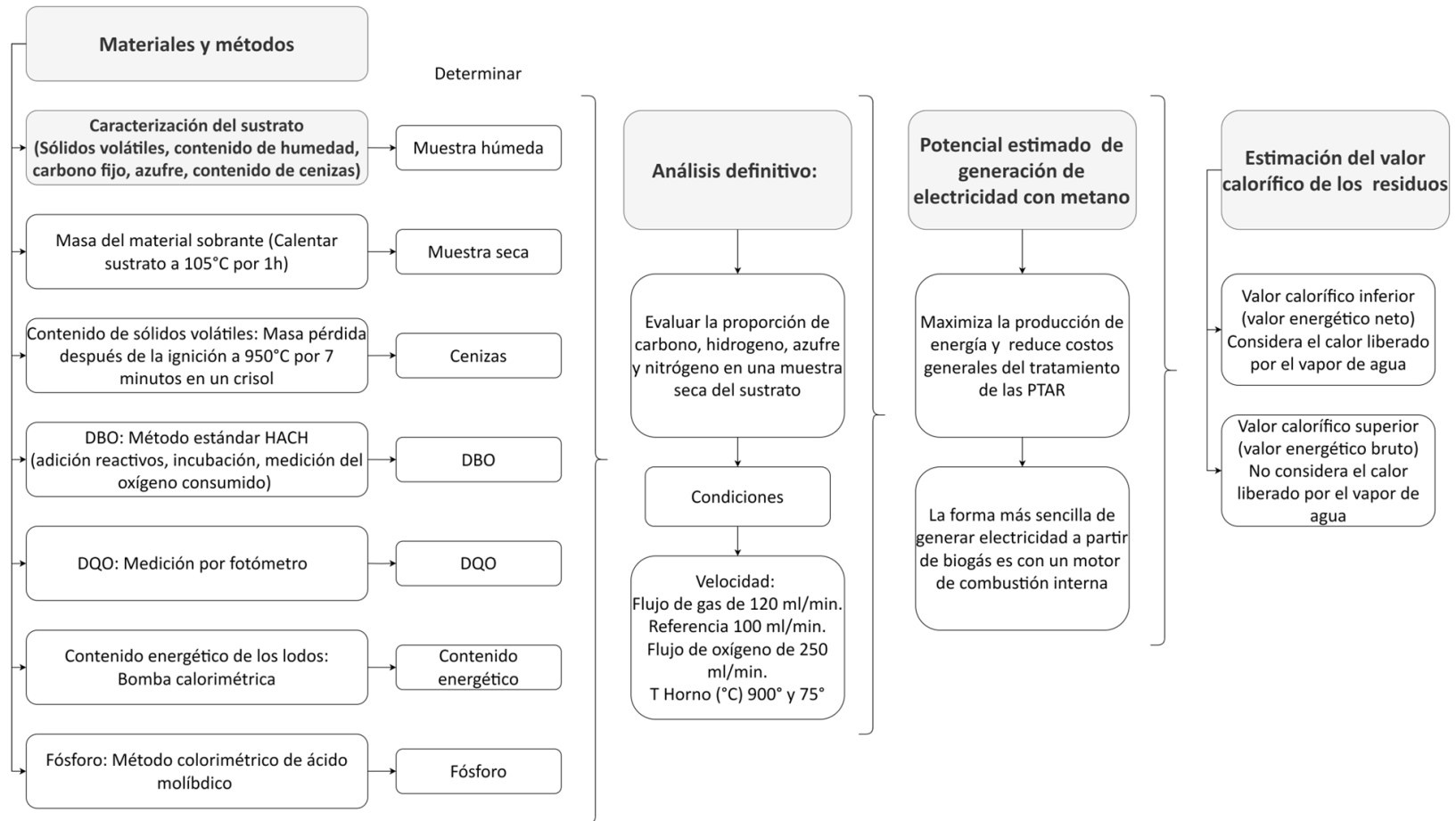
Table 1. Biogas yield for different feedstocks [18].

Feedstock	CS	DM	FOG	FW	M	OFMSW	PS	RS	WAS	WS
Theoretical CH ₄ yield (L/kg TS)	324	228	622	494	582	211-657	418	301	363	300
Experimental CH ₄ yield (L/kg TS)	241	51	580	510	420	170-557	213	281	186	245

CH₄: Methane, CS: Corn stover, DM: Dairy manure, FOG: Fat, oil, and grease, FW: Food waste, M: Microalgae, OFMSW: Organic fraction of municipal solid waste, PS: Primary sludge, RS: Rice straw, WAS: Waste activated sludge, WS: Wheat straw.

Fuente: Autor, 2023 a partir de (Lima, 2023)

Figura 13 Metodología de investigación Estudio 2



Fuente: Autor, 2023 a partir de (Admasu, 2022)

Figura 14 Metodología y resultados de investigación Estudio 4

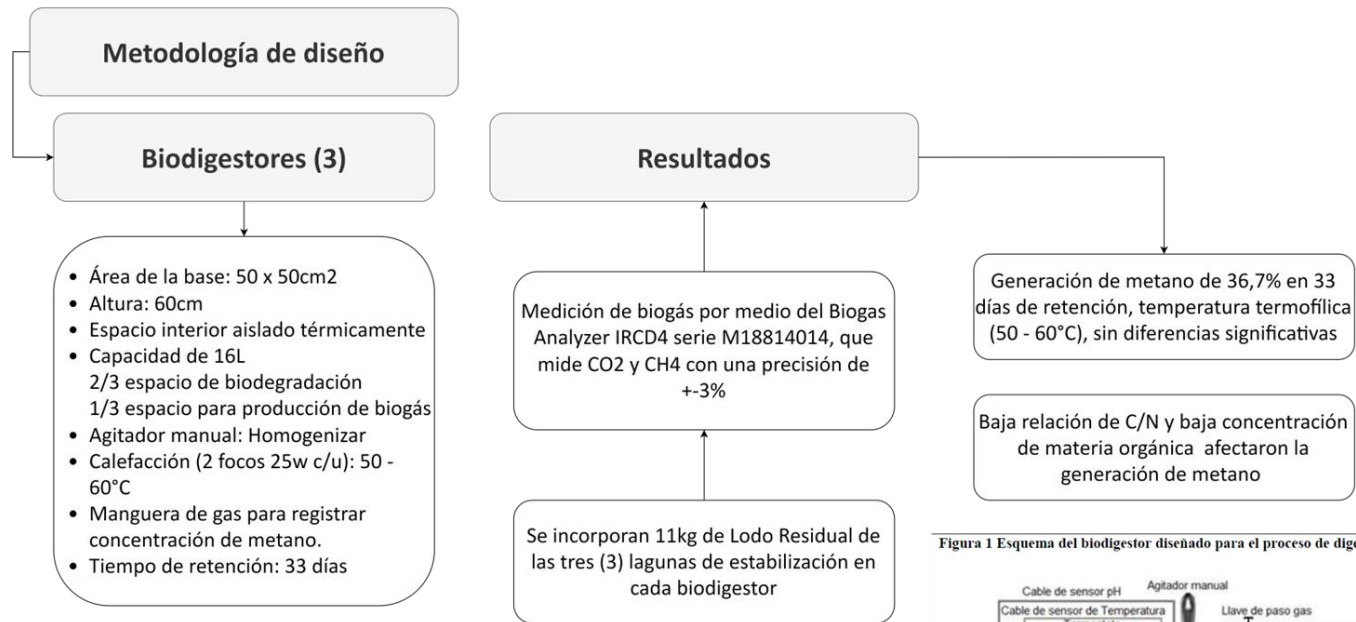
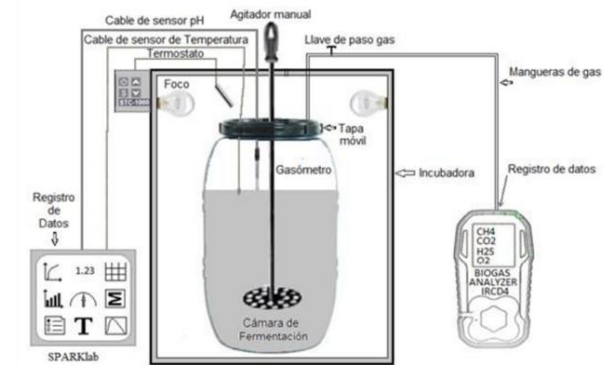
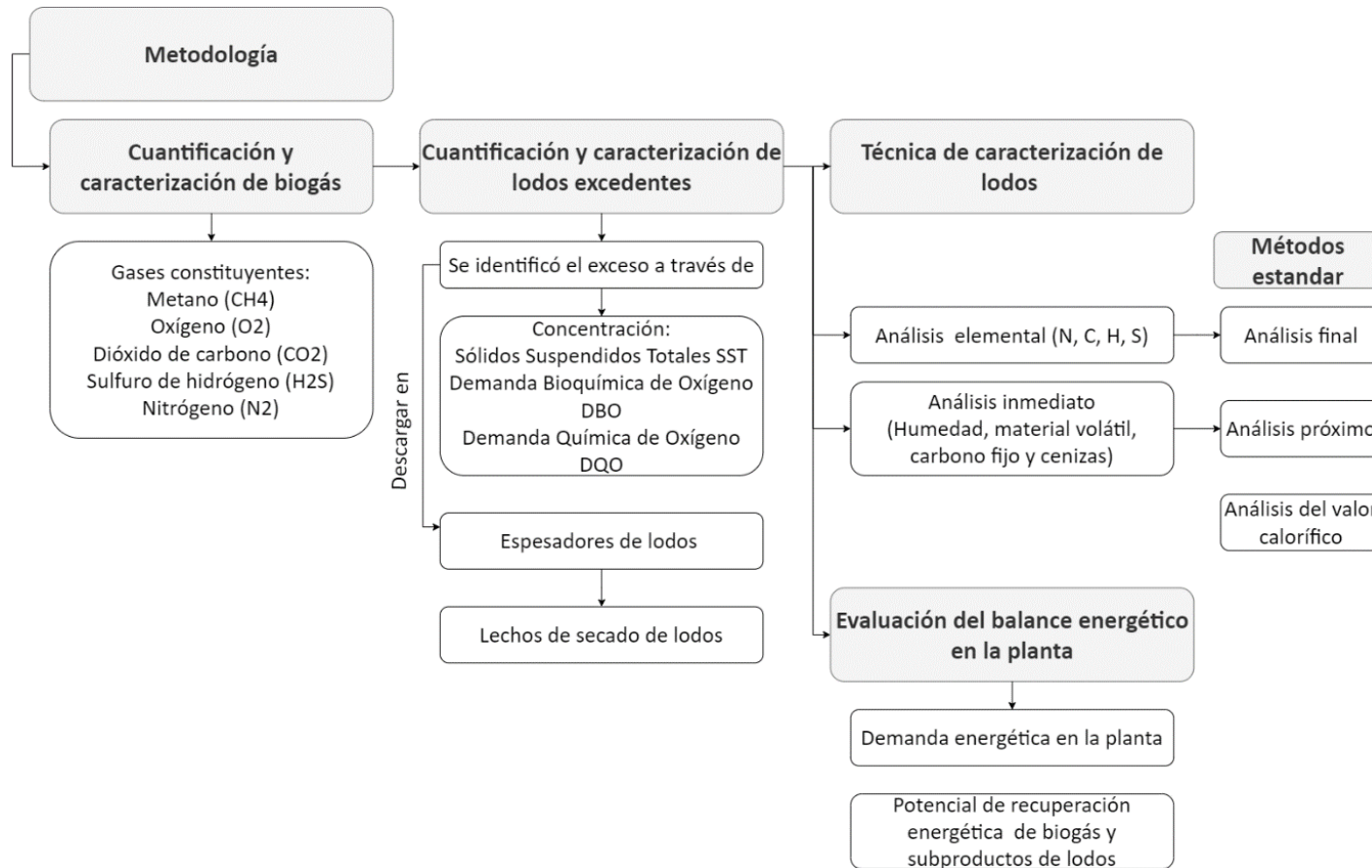


Figura 1 Esquema del biodigestor diseñado para el proceso de digestión anaeróbica de los LR



Fuente: Autor, 2023 a partir de (Gutiérrez, y otros, 2021)

Figura 15 Metodología para el estudio 5



Fuente: Autor, 2023 a partir de (Adantey Arthur, 2023)

Tabla 30 Matriz de la evaluación de impacto ambiental en el ciclo de vida del digestor anaerobio

Medio	Elemento	Impacto	FASES EN EL CICLO DE VIDA DEL DIGESTOR ANAEROBIO DE MEZCLA COMPLETA																	
			Construcción							Operación					Mantenimiento			Desmantelamiento		
			Obtención de materiales	Preparación del terreno	Acopio de materiales	Tránsito de vehículos y maquinarias	Construcción de obras civiles	Generación de residuos y aguas servidas	Construcción de zonas verdes	Alimentación con lodos residuales y otros sustratos orgánicos	Estabilización y reducción de sólidos orgánicos	Producción de biogás (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S)	Suministro de energía eléctrica	Generación de vectores sanitarios	Limpieza y remoción de lodos digeridos	Reparaciones y sustituciones de partes o materiales	Monitoreo de condiciones de los procesos	Reciclaje final de vida útil	Lodos digeridos valorizados con otro uso	Disposición de residuos
Componente físico	Matriz suelo	Modificación de las propiedades físicas del suelo	10	10	0	10	10	5	10	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	10
		Modificación del paisajismo	10	10	0	5	12	2	10	3	0	0	0	10	5	0	0	0	0	10
	Matriz agua	Modificación de la calidad del agua superficial	2	2	0	0	5	10	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	10
		Modificación de la calidad del agua subterránea	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	Matriz aire	Emisión de ruidos	7	7	0	7	7	0	0	8	8	8	8	0	8	8	3	3	0	0
		Emisión de olores	0	0	0	3	5	10	0	15	15	0	0	15	15	0	3	3	15	15
		Emisión de gases	3	3	0	3	3	0	3	6	6	2	4	0	4	0	3	3	4	10

Diseño de un digestor anaeróbico para el aprovechamiento de lodos y producción de biogás en la PTAR Salitre de Bogotá, Colombia

Medio	Elemento	Impacto	FASES EN EL CICLO DE VIDA DEL DIGESTOR ANAEROBIO DE MEZCLA COMPLETA																	
			Construcción						Operación					Mantenimiento			Desmantelamiento			
			Obtención de materiales	Preparación del terreno	Acopio de materiales	Tránsito de vehículos y maquinarias	Construcción de obras civiles	Generación de residuos y aguas servidas	Construcción de zonas verdes	Alimentación con lodos residuales y otros sustratos orgánicos	Estabilización y reducción de sólidos orgánicos	Producción de biogás (CH4, CO2, H2S)	Suministro de energía eléctrica	Generación de vectores sanitarios	Limpieza y remoción de lodos digeridos	Reparaciones y sustituciones de partes o materiales	Monitoreo de condiciones de los procesos	Reciclaje final de vida útil	Lodos digeridos valorizados con otro uso	Disposición de residuos
		Emisión de material particulado PM	1	1	0	2	3	0	1	2	1	2	0	0	1	8	3	3	0	15
Componente biótico	Flora	Modificación del estado de la flora	13	13	0	13	13	5	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
	Fauna	Modificación del estado de la fauna	15	15	0	15	15	5	15	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	15
Componente antrópico	Patrimonio	Alteración en el patrimonio arqueológico	19	19	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
	Cultura	Alteración en la identidad cultural	19	19	0	0	19	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	15
	Socioeconómico	Generación de empleo	21	21	21	21	21	0	21	21	0	21	21	0	21	21	21	21	21	10
		Cambio de uso del suelo	23	23	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Accidentes laborales	22	22	22	22	22	0	22	10	22	22	22	22	22	22	22	10	10	10

Fuente: Autor, 2023