

Propuesta preliminar de estrategia tecnológica para la remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás generado a partir de POME en la Extractora Monterrey

Iván Andrés Chacón Díaz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica empresarial

Director

Luis Enrique Lambis Benitez

Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Química

Tutor

Didier Aleisso Gutiérrez Lozano

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios, por las oportunidades y la sabiduría brindada en cada paso de mi camino; por hacerme una persona resiliente y permitirme cumplir mis metas a pesar de las dificultades.

A mis padres, Alejandra Díaz y Abelardo Chacón, pilares fundamentales de mi vida. Su apoyo, compañía, trabajo incansable y sacrificio silencioso construyeron el escenario sobre el cual hoy cumplo mis sueños.

Al resto de mi familia, motor y apoyo incondicional. Gracias por verme como un ejemplo al ser el primer profesional de la familia y por recordarme siempre de dónde vengo para darme la fuerza de decidir hacia dónde voy.

A mis amigos de la universidad, cuyo cariño me dio la fortaleza y confianza para seguir adelante. A mis amigos de la empresa, quienes me acogieron como parte de su familia y me enseñaron con paciencia y cariño

A todas las personas que, con pequeños gestos de apoyo, amabilidad y confianza, fortalecieron mi espíritu para poder llegar hasta aquí.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, por brindarme el espacio y las herramientas necesarias para mi formación académica y profesional.

A la Extractora Monterrey S.A.S., por abrirme sus puertas y permitirme realizar mis prácticas profesionales en sus instalaciones. Gracias por la confianza depositada en mí y por facilitarme los recursos que fueron la base para la elaboración de este proyecto.

A mi director de trabajo de grado, el profesor Luis Lambis, por su orientación, rigor académico, dedicación y apoyo constante en todo este proceso; agradezco especialmente su paciencia, la cual me permitió realizar un mejor proceso investigativo. De igual manera, a mi tutor Didier Gutiérrez, por su acompañamiento, sus valiosos consejos y por ser un apoyo fundamental en el desarrollo práctico de esta investigación.

A mis amigos de la empresa, en especial a Luz Amorocho y Jhon Macias, cuyo conocimiento y dedicación nutrieron las bases necesarias para este proyecto.

Finalmente, a mis padres, quienes fueron mi soporte constante y con su amor incondicional me inspiraron a dar siempre lo mejor de mí, permitiéndome culminar esta etapa con éxito.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. MARCO CONCEPTUAL	15
2.1 Contexto de la digestión anaerobia del POME.....	15
2.2 Formación del H ₂ S y estrategias para su control	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1 Diagnóstico del sistema de biodigestión de la Extractora Monterrey.....	17
3.2 Identificación de alternativas tecnológicas de remoción de H ₂ S	21
3.2 Evaluación de estrategias tecnológicas para la remoción de H ₂ S en biogás.....	24
4. RESULTADOS.....	27
4.1 Diagnóstico del estado operativo y estabilidad biológica del sistema.....	27
4.2 Matriz de alternativas tecnológicas de desulfurización seleccionadas	35
4.3 Selección de la estrategia tecnológica mediante el análisis jerárquico (AHP).....	42
4.3.1 <i>Propuesta preliminar de implementación tecnológica</i>	44
5. CONCLUSIONES	46
6. RECOMENDACIONES.....	47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 49

APÉNDICES..... 57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudio.....	23
Tabla 2. Escala fundamental de Saaty	26
Tabla 3. Síntesis de tecnologías de remoción de H ₂ S	39
Tabla 4. Pesos de criterios y subcriterios de evaluación.....	42
Tabla 5. Pesos locales de los grupos tecnológicos por subcriterios (%)......	43
Tabla 6. Resultados de la priorización tecnológica global	44
Tabla 7. Matriz de comparaciones pareadas	62
Tabla 8. Índice de aleatoriedad (IA)	64

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Etapas bioquímicas de la digestión anaerobia.	15
Figura 2. Esquema metodológico del desarrollo de la investigación.....	17
Figura 3. Puntos de muestreo y parámetros analizados	20
Figura 4. Estructura jerárquica del modelo AHP para la selección de tecnología.....	25
Figura 5. PFD del sistema de biodigestión anaerobia de la Extractora Monterrey.....	28
Figura 6. Volumen mensual de biogás destinado a CHP y TEA en cada biodigestor	30
Figura 7. Distribución temporal de la calidad del biogás (H ₂ S)	31
Figura 8. Caracterización fisicoquímica del sustrato alimentado a cada biodigestor	33
Figura 9. Composición del biogás (CH ₄ y CO ₂) y concentración del H ₂ S	34
Figura 10. Diagrama PRISMA del proceso de selección de documentos	36
Figura 11. Propuestas tecnológicas de remoción de H ₂ S.....	45

Lista de Apéndices

Apéndice A. Requisitos de calidad de los generadores CHP400.....	57
Apéndice B. Fundamento y método de cálculo del índice buffer- CENIPALMA	58
Apéndice C. Registro en tiempo real del analizador Awiflex	59
Apéndice D. Análisis de sensibilidad realizada a los términos en Scopus	60
Apéndice E. Formulario de Google forms aplicado a operador.	61
Apéndice F. Matriz de comparaciones pareadas con los juicios emitidos.....	62

Resumen

Título: Propuesta preliminar de estrategia tecnológica para la remoción de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el biogás generado a partir de POME en la Extractora Monterrey *

Autor: Iván Andrés Chacón Díaz **

Palabras Clave: POME, biogás, H₂S, digestión anaerobia, microaireación

Descripción: Los efluentes de la extracción de aceite de palma (POME) son aprovechados mediante digestión anaerobia para producir biogás; sin embargo, este proceso genera concentraciones de H₂S que superan el límite de 200 ppm establecido por el fabricante de los generadores CHP400 de la Extractora Monterrey S.A.S. (Puerto Wilches, Colombia), ocasionando corrosión, fallas operativas y pérdidas energéticas cuantificables. Esta práctica empresarial propone una estrategia tecnológica preliminar para la remoción complementaria de H₂S en el biogás generado a partir de POME. La metodología se desarrolló en tres etapas: caracterización operativa y fisicoquímica del sistema de digestión anaerobia, revisión bibliográfica sistemática bajo el enfoque PRISMA, y evaluación comparativa de alternativas mediante el método de decisión multicriterio AHP. Los resultados muestran que los biodigestores operan con un tiempo de residencia hidráulica (TRH) de 37–40 días y una tasa de carga orgánica (TCO) de 0,72–0,77 kg DQO/m³·día, dentro de rangos estables, pero con concentraciones de H₂S que superan frecuentemente el límite técnico, con picos de hasta 2.109 ppm, atribuibles a la resiliencia selectiva de las bacterias sulfatorreductoras y a la insuficiencia de la microaireación existente. La revisión bibliográfica permitió identificar seis grupos tecnológicos a partir de 36 documentos seleccionados. Mediante el modelo AHP, se determinó que el mecanismo biológico ex situ específicamente el biofiltro de goteo en ruta alcalina a temperatura ambiente es la estrategia complementaria más adecuada (puntuación global: 43,52%), por su balance entre alta eficiencia de remoción (>95%), bajo costo operativo y alta madurez tecnológica (TRL 8–9). La implementación proyectada permitiría evitar pérdidas del orden de 255.866 kWh y más de 229 millones de COP en un periodo similar al evaluado (nueve meses).

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Luis Enrique Lambis Benítez, M.Sc. Tutor: Didier Aleisso Gutiérrez Lozano, Ing.

Abstract

Title: Preliminary proposal for a technological strategy for the removal of hydrogen sulfide (H₂S) in biogas generated from POME at the Monterrey extraction plant *

Author: Iván Andrés Chacón Díaz

Key Words: POME, biogas, H₂S, anaerobic digestion, microaeration

Description: Palm oil mill effluent (POME) is utilized through anaerobic digestion to produce biogas; however, this process generates H₂S concentrations that exceed the 200 ppm limit established by the manufacturer of the CHP400 generators at Extractora Monterrey S.A.S. (Puerto Wilches, Colombia), causing corrosion, operational failures, and quantifiable energy losses. This business practice proposes a preliminary technological strategy for the complementary removal of H₂S from biogas generated from POME. The methodology was developed in three stages: operational and physicochemical characterization of the anaerobic digestion system, a systematic literature review following the PRISMA guidelines, and a comparative evaluation of alternatives using the AHP multi-criteria decision-making method. The results show that the biodigesters operate with a hydraulic retention time (HRT) of 37–40 days and an organic loading rate (OLR) of 0.72–0.77 kg COD/m³·day, within stable ranges, but with H₂S concentrations that frequently exceed the technical limit, with peaks of up to 2,109 ppm, attributable to the selective resilience of sulfate-reducing bacteria and the inadequacy of the existing microaeration. The literature review identified six technological groups based on 36 selected documents. Using the AHP model, it was determined that the ex situ biological mechanism—specifically, the alkaline trickle filter operating at room temperature—is the most appropriate complementary strategy (overall score: 43.52%), due to its balance of high removal efficiency (>95%), low operating costs, and high technological maturity (TRL 8–9). The projected implementation would prevent losses of approximately 255,866 kWh and more than 229 million COP over a period similar to the one evaluated (nine months).

*Degree Work

**Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Luis Enrique Lambis Benítez, M.Sc. Tutor: Didier Aleisso Gutiérrez Lozano, Eng.

Introducción

En 2024, la agroindustria de la palma de aceite en Colombia procesó 1.719.809 toneladas de aceite crudo (CPO) y 7.824.756 toneladas de racimos de fruto fresco (RFF) (Fedepalma, 2025). Durante la extracción se genera el efluente de molino de aceite de palma (POME), con una producción típica de 0,6–0,8 m³ por tonelada de RFF (Althausen, 2016; Haryanto et al., 2021), lo que permite estimar que en 2024 se generaron entre 4,69 y 6,26 millones de m³ de POME a nivel nacional. Debido a su alta carga orgánica (DQO: 50.000–100.000 mg/L; DBO: 10.250–43.750 mg/L), su vertido sin control agota el oxígeno disuelto, provocando eutrofización y deterioro de la calidad del agua (Mohammad et al., 2021). No obstante, esta misma concentración de materia orgánica valida al POME como sustrato óptimo para la digestión anaerobia (DA), con rendimientos de biogás de 25–35 m³ por m³ de efluente tratado mitigando además la emisión descontrolada de gases de efecto invernadero. (Althausen, 2016)

La DA transforma la materia orgánica en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, produciendo una mezcla gaseosa rica en metano y CO₂, con trazas de H₂S (Appels et al., 2008). El contenido de azufre del sustrato alimenta a las bacterias sulfatorreductoras (BSR), que reducen el SO₄²⁻ a H₂S compitiendo con las arqueas metanogénicas por sustratos clave como el hidrógeno y el acetato, lo que puede comprometer la estabilidad del proceso y reducir el rendimiento de metano (Tripathi et al., 2021). En sistemas a base de POME, la literatura reporta rangos típicos de H₂S entre 10 y 10.000 ppm, con valores puntuales mayores ante alta carga orgánica o inestabilidad del pH y el ORP (Vu et al., 2021; Vikrant et al., 2018). Dado que el H₂S es altamente corrosivo para componentes metálicos, tuberías y sistemas de lubricación, el aprovechamiento del biogás en motores de combustión interna o microturbinas

exige una desulfurización previa hasta concentraciones ≤ 500 ppm (Bailón & Hinge, 2012; Petersson & Wellinger, 2009).

Las alternativas de remoción se pueden clasificar en fisicoquímicas como adsorción en sólidos (óxidos férricos, carbón activado) y absorción en líquidos mediante lavado químico y biológicas como los biofiltros, biotrickling filters y bioscrubbers (Bailón & Hinge, 2012). La selección requiere equilibrar criterios técnicos y económicos: los métodos fisicoquímicos destacan por alta eficiencia, pero implican costos recurrentes por reposición de materiales; los biológicos presentan menores costos operativos y menor huella ambiental, aunque son más sensibles a fluctuaciones en la carga de sulfuro (Vu et al., 2021). La elección final de una tecnología de remoción está condicionada al caudal, la concentración de H₂S, el grado de pureza requerido y la viabilidad económica del sitio (Bailón & Hinge, 2012; Vu et al., 2021).

Palmas y Extractora Monterrey S.A.S., ubicada en Puerto Wilches, Santander, es una empresa referente del sector agroindustrial con más de 60 años de trayectoria. En 2022 implementó dos biodigestores tipo laguna cubierta para el tratamiento del POME (200–700 m³/día), produciendo biogás para alimentar cuatro generadores CHP400 (250 kW cada uno) destinados a la autogeneración eléctrica de la planta. Sin embargo, la concentración de H₂S supera frecuentemente las 200 ppm, límite técnico del fabricante para garantizar la integridad del motor y respetar los periodos de mantenimiento (CHP Brasil, s.f.). Aunque se ha empleado microaireación para reducir este contaminante, no se ha logrado mantenerlo en niveles seguros de forma sostenida (Extractora Monterrey S.A.S., 2024), lo que ha provocado dificultades de arranque, mayor frecuencia de mantenimientos preventivos y riesgo de fallas prematuras, elevando los costos operativos de la planta.

Esta variabilidad representa un reto técnico con implicaciones económicas directas: la falta de un sistema de desulfurización efectivo obliga a sustituir la autogeneración con energía de la red (ESSA) o a intensificar el uso de la turbina de vapor, con un costo de oportunidad de hasta \$16.800.000 COP diarios bajo plena carga de los cuatro generadores (tarifa industrial de \$700 COP/kWh), al que se suman los costos de mantenimiento correctivo por la corrosión del gas. Por ello, este trabajo de grado, en la modalidad de Práctica Empresarial, caracteriza el sistema anaerobio de la Extractora Monterrey (parámetros de desempeño, pH, potencial redox (ORP), alcalinidad y composición de gases) para establecer una línea base sólida y, a partir de esta, comparar bajo criterios estandarizados de eficiencia técnica, viabilidad económica y compatibilidad operativa las alternativas de desulfurización que mejor se integren a la infraestructura existente. En este marco surge la pregunta de investigación: ¿Cuál estrategia tecnológica de remoción es la más efectiva para mantener el H₂S del biogás dentro de los límites operativos exigidos por el fabricante de los generadores en la Extractora Monterrey?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer una estrategia tecnológica para la remoción de H₂S en el biogás producido por la Extractora Monterrey.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar la operación del digestor anaerobio en la Extractora Monterrey.

Identificar alternativas tecnológicas de remoción de H₂S, en procesos de digestión anaerobia por medio de una revisión bibliográfica.

Evaluar alternativas tecnológicas para la remoción de H₂S presente en el biogás en alineación con las necesidades y limitaciones técnicas de la Extractora Monterrey.

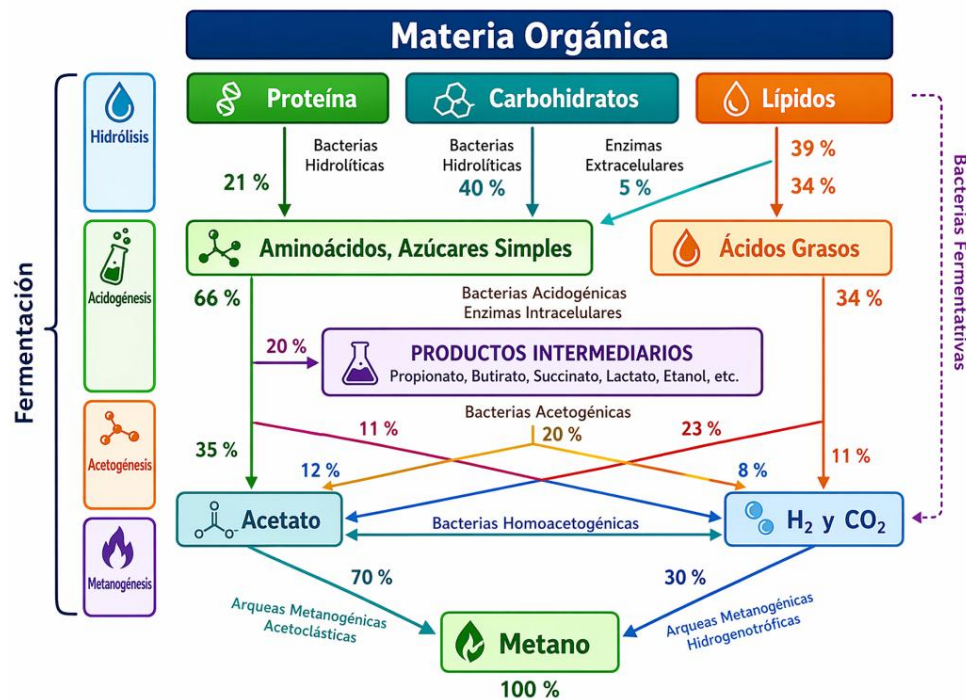
2. Marco conceptual

2.1 Contexto de la digestión anaerobia del POME

La agroindustria de la palma de aceite en Colombia aporta cerca del 17% del PIB agrícola nacional (Fedepalma, 2025). Durante el beneficio se genera el efluente de molino de palma (POME), un residuo líquido con alta carga orgánica que, además de representar un desafío ambiental, constituye un sustrato adecuado para la producción de biogás mediante digestión anaerobia (DA) (Mohammad et al., 2021; Ortiz, 2019). Este proceso biotecnológico degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno para generar una mezcla gaseosa rica en metano y se desarrolla a través de cuatro etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Appels et al., 2008), ilustradas en la Figura 1.

Figura 1.

Etapas bioquímicas de la digestión anaerobia.



Nota. Tomado de Cruz Salomón (2018).

Como se observa en la Figura 1, durante la hidrólisis las enzimas extracelulares descomponen polímeros complejos, como proteínas, carbohidratos y lípidos, en compuestos solubles que pueden ser aprovechados por las bacterias. Posteriormente, en la acidogénesis, estos compuestos son transformados en ácidos grasos volátiles, alcoholes y CO₂; además, la degradación de aminoácidos azufrados inicia la liberación de precursores del sulfuro de hidrógeno (H₂S) (Appels et al., 2008).

En la etapa de acetogénesis, los productos generados previamente son convertidos principalmente en acetato e hidrógeno por bacterias acetogénicas (Stams & Plugge, 2009). En esta fase, las bacterias sulfatorreductoras (BSR) pueden competir por los sustratos disponibles y favorecer la formación de H₂S. Finalmente, durante la metanogénesis, arqueas especializadas producen metano (CH₄) a partir de acetato o de la reducción de CO₂ con hidrógeno. Esta etapa es particularmente sensible a la presencia de compuestos tóxicos, entre ellos el H₂S, cuya acumulación puede afectar el desempeño del sistema (Angelidaki et al., 2018).

2.2 Formación del H₂S y estrategias para su control

El H₂S es uno de los principales contaminantes presentes en el biogás generado a partir de POME. Se forma principalmente por la reducción biológica de sulfatos y la degradación de aminoácidos azufrados (Zhang & Li, 2023). Su presencia es problemática debido a que provoca corrosión en tuberías, motores y otros equipos metálicos, además de degradar los lubricantes utilizados en sistemas de cogeneración (Ryckebosch et al., 2011). Por esta razón, los equipos de aprovechamiento energético requieren bajas concentraciones de H₂S para garantizar una operación estable y prolongar su vida útil (Bailón & Hinge, 2012; Petersson & Wellinger, 2009).

Las tecnologías de control de H₂S pueden clasificarse según su punto de aplicación en: i) pretratamiento, orientado a reducir el contenido de azufre en el sustrato antes de la digestión

anaerobia (Vu et al., 2021); ii) control in-situ, basado en la inhibición de bacterias sulfatorreductoras o la oxidación biológica del sulfuro dentro del digestor (Lens et al., 1998); y iii) postratamiento o ex-situ, que remueve el H₂S del biogás mediante procesos fisicoquímicos o biológicos antes de su aprovechamiento energético (Tajarudin et al., 2020; Wierzbińska & Juraszek, 2024).

3. Metodología

En la Figura 2 se presenta el diseño metodológico adoptado:

Figura 2.

Esquema metodológico del desarrollo de la investigación



3.1 Diagnóstico del sistema de biodigestión de la Extractora Monterrey

Esta etapa comprendió la caracterización operativa del sistema de tratamiento anaerobio de la Extractora Monterrey S.A.S. (Puerto Wilches, Santander) y la caracterización fisicoquímica de sus parámetros de estabilidad y concentración de H₂S.

Para la caracterización operativa se recopilaron el volumen efectivo de diseño de los biodigestores (V) y las variables con registro diario: caudales de POME crudo a la unidad de eualización, caudales de alimentación (Q_p) y recirculación (Q_r) a cada biodigestor, flujos de biogás (derivados a la antorcha de seguridad (TEA) o a cogeneración (CHP)) y electricidad producida. Los registros abarcaron nueve meses de operación normal (enero–septiembre de 2025), excluyendo paradas técnicas. El análisis se realizó mediante promedios representativos del periodo, enfoque que, según Metcalf & Eddy (2014), evalúa parámetros operativos minimizando el sesgo de mediciones atípicas y describe la carga orgánica sostenida por la biomasa.

A partir de los promedios de Q_p y Q_r se calcularon dos indicadores de desempeño operativo: el Tiempo de Residencia Hidráulica (TRH) y la Tasa de Carga Orgánica (TCO). El TRH, que permite conocer el periodo de contacto entre la materia orgánica y la biomasa se calculó mediante la Ecuación 1, considerando que la recirculación (Q_r) contribuye al caudal total que atraviesa al digestor.

$$TRH = \frac{V}{Q_p + Q_r} \quad \text{Ec. 1}$$

La TCO es un indicador que representa la cantidad de materia orgánica aplicada diariamente por unidad de volumen de reactor, se determinó mediante la Ecuación 2 integrando Q_p, el volumen y la concentración promedio de DQO del afluente, que se obtuvo a partir de registros históricos con frecuencia de cuatro veces por semana, siguiendo los protocolos de CENIPALMA (2023) :

$$TCO = \frac{Q_p \times DQO_{afluente}}{V} \quad \text{Ec.2}$$

Para evaluar la relación entre la calidad del biogás y su aprovechamiento energético se realizaron dos análisis. Primero, se calcularon los volúmenes mensuales de biogás enviados a

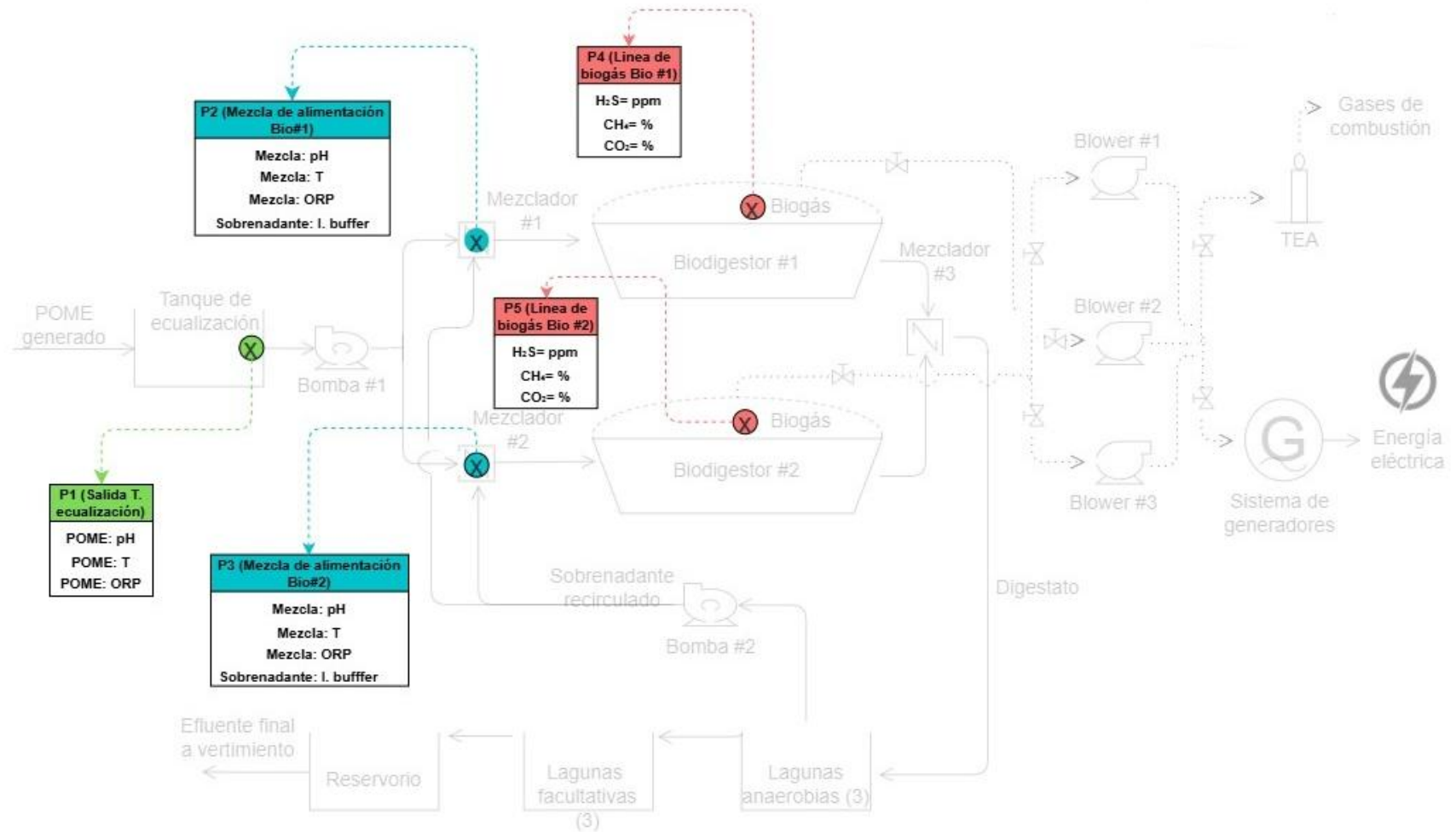
cogeneración (CHP) y a la antorcha (TEA) por biodigestor, y se determinó la eficiencia de aprovechamiento como el porcentaje del biogás total dirigido a CHP. Segundo, se clasificaron las mediciones de H₂S del equipo Awite AwiFLEX Cool+ (cada 2 horas) en cinco rangos: tolerable (0–200 ppm), moderadamente alto (201–500 ppm), alto (501–1000 ppm), crítico (1000–1500 ppm) y extremo (>1500 ppm); con estos datos se elaboró un gráfico de barras apiladas al 100% que muestra la proporción de tiempo en cada nivel de calidad por mes y biodigestor.

Como síntesis de la caracterización operativa se elaboró un Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) que integra la configuración física, los flujos y las variables calculadas, facilitando la identificación de desviaciones operativas y proporcionando el contexto técnico necesario para interpretar la respuesta metabólica del sistema.

Definido el marco operativo, se procedió con la caracterización fisicoquímica, realizada de forma simultánea al monitoreo operativo (enero–septiembre de 2025) utilizando los datos de laboratorio generados durante la operación normal de la unidad de equalización y los biodigestores tipo laguna cubierta. Los registros de laboratorio se procesaron mediante promedios mensuales, tratamiento que, conforme a Montgomery & Runger (2013), reduce el impacto de la variabilidad aleatoria y errores de medición en procesos continuos. La escala mensual responde a la dinámica típica de sistemas anaerobios con altos tiempos de retención, como los tipo laguna, donde los cambios de estabilidad se manifiestan en escalas superiores a la semana (Hosseini & Wahid, 2015). La desviación estándar mensual se empleó como indicador adicional de estabilidad, especialmente para detectar fluctuaciones en H₂S. Con este enfoque, se establecieron puntos de control a lo largo del proceso: en la unidad de equalización, en los mezcladores y en los biodigestores, incluyendo la fase gaseosa. La Figura 3 ilustra la ubicación de estos puntos y los parámetros analizados en cada etapa.

Figura 3.

Puntos de muestreo y parámetros analizados



En los puntos de fase líquida correspondientes a la entrada al tanque de equalización (P1) y zonas de mezcla de alimentación de cada biodigestor (P2 y P3) se midieron pH, ORP y temperatura in situ, mediante un medidor HI 991003 (Hanna Instruments) debidamente calibrado. El punto P1 caracterizó el POME crudo antes de la mezcla con el sobrenadante recirculado; P2 y P3 evaluaron el efecto de la recirculación sobre las condiciones del sustrato. En estos mismos puntos se analizó el Índice Buffer (IB) del sobrenadante recirculado como medida de la capacidad tampón, siguiendo los procedimientos de CENIPALMA (2023) y los métodos estandarizados de APHA et al. (2017). El fundamento y método de cálculo del IB a partir de la alcalinidad parcial y total se presenta en el Apéndice B.

En la fase gaseosa, los puntos P4 y P5 ubicados en las líneas de biogás de cada biodigestor permitieron medir CH₄, CO₂ y H₂S mediante el analizador multigas Awite AwifLEX Cool+, integrado permanentemente al sistema de control de la planta. La relación CH₄/CO₂ se empleó como indicador del desempeño energético y la estabilidad del proceso, al reflejar el equilibrio de las poblaciones metanogénicas y detectar desviaciones en la ruta metabólica (Li et al., 2018). La concentración de H₂S permitió determinar si el biogás cumple con los requerimientos de calidad para su aprovechamiento en los generadores. En el Apéndice C se presenta una imagen del registro en tiempo real de estas variables durante la operación de los biodigestores.

3.2 Identificación de alternativas tecnológicas de remoción de H₂S

Dado que el biogás tratado se destinará a los generadores CHP400 de la Extractora Monterrey S.A., los cuales exigen concentraciones de H₂S inferiores a 200 ppm, así como concentraciones concretas de metano, los requisitos del generador se pueden consultar en el Apéndice A. la revisión bibliográfica se orientó hacia soluciones capaces de alcanzar ese umbral bajo las condiciones operativas de los biodigestores. La revisión se estructuró en dos actividades

secuenciales: (1) construcción de la ecuación de búsqueda y definición del conjunto de documentos a revisar, y (2) selección y análisis de documentos para identificar tecnologías con potencial de implementación.

La búsqueda se realizó en Scopus, base de datos seleccionada por permitir el acceso a múltiples editoriales en una sola consulta, conforme al rigor de revisiones previas (Jarzębowicz & Weichbroth, 2021). La ecuación de búsqueda integró términos equivalentes con operadores OR/AND, comillas para frases exactas y truncamientos (*) para capturar variaciones léxicas. Los términos cubrieron cuatro dimensiones: fuente energética (biogas, biomethane, "sour gas"), proceso biológico ("Anaerobic digestion", AD), contaminante ("hydrogen sulfide", H₂S) y acción de control (control, abatement, mitigation, removal, treatment, clean*, desulfurization, technolog*, purif*, reduction). Esta última lista se definió mediante un análisis de sensibilidad incremental, que consistió en probar términos adicionales, evaluando en cada paso cuántos documentos nuevos aportaban, alcanzándose la saturación cuando la inclusión de nuevos términos no aportaba documentos adicionales, el proceso con más detalle se presenta en el Apéndice D. La ecuación final fue: (biogas* OR biomethane OR "sour gas") AND ("Anaerobic digestion" OR AD) AND ("hydrogen sulfide" OR H₂S) AND (control OR abatement OR mitigation OR removal OR treatment OR clean* OR desulfurization OR technolog* OR purif* OR reduction).

Los registros se refinaron con filtros de Scopus limitando a artículos científicos y de revisión en inglés o español, publicados entre 2015 y 2026, correspondientes a los criterios I1, E1 y E2 de la Tabla 1.

Tabla 1.*Criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudio*

Código	Criterios de inclusión	Código	Criterios de exclusión
I1	Artículos científicos o artículos de revisión	E1	Escrito en un idioma distinto al inglés o español
I2	Describe el mecanismo o principio de funcionamiento de la tecnología de remoción de H ₂ S.	E2	Publicado fuera del periodo 2015 - 2026
I3	Se centra en biogás proveniente de digestión anaerobia.	E3	El H ₂ S no es el contaminante principal evaluado.
I4	Presenta datos de desempeño a escala industrial, piloto o modelos que presentan parámetros como eficiencia, carga de H ₂ S y costos.	E4	Las concentraciones de H ₂ S evaluadas están fuera del rango de interés para esta planta (≤ 200 ppm en el producto tratado, y valores típicos en el biogás crudo provenientes de la digestión anaerobia de hasta 10.000 ppm (Vu et al., 2022)).
		E5	Tecnologías que requieran infraestructura altamente especializada, reactivos no disponibles regionalmente o escalas mínimas de operación muy superiores al caudal de biogás de la planta (≤ 244 Nm ³ /h), sin evidencia de adaptabilidad.

La selección siguió una adaptación del protocolo PRISMA (Moher et al., 2009), en la que se sustituyeron los criterios de sesgo clínico por criterios de madurez tecnológica y aplicabilidad industrial, se omitió la evaluación de sesgo de publicación por no ser pertinente, y el cribado fue realizado por un único revisor. El proceso comprendió tres etapas: (1) eliminación de duplicados por DOI; (2) tamizaje por título y resumen según los criterios de la Tabla 1; y (3) lectura a texto completo para confirmar elegibilidad.

De cada documento seleccionado se extrajo: principio de funcionamiento, eficiencia de remoción, rango de concentración de H₂S manejable, condiciones operativas, madurez tecnológica (TRL) y costos aproximados (CAPEX/OPEX). El TRL se asignó según la escala 1–9 de la NASA/DOE adaptando los criterios a la información reportada en cada fuente (p. ej., TRL 4 para prototipo validado en laboratorio, TRL 6–7 para piloto en condiciones reales, TRL 8–9 para tecnología comercial disponible) (Mankins, 2009).

Dado que múltiples estudios abordaban una misma tecnología con diferencias en condiciones experimentales, escala y forma de reporte, lo que impedía combinar datos cuantitativamente, los hallazgos se sintetizaron por tipo de tecnología siguiendo las

recomendaciones de la guía SWiM (Campbell et al., 2020). Los documentos se agruparon por principio de funcionamiento; de cada grupo se extrajeron rangos mínimo–máximo de eficiencia de remoción y concentración manejable de H₂S, el mayor TRL reportado y las condiciones operativas más representativas. Los costos CAPEX/OPEX se normalizaron cualitativamente dividiendo cada valor numérico entre el máximo encontrado para su tipo entre todas las tecnologías, clasificándolo como bajo ($\leq 0,33$), moderado (0,34–0,66) o alto ($\geq 0,67$); cuando los documentos solo reportaban rangos o descripciones cualitativas, la categoría se asignó de forma conservadora con el mismo criterio. La información se consolidó en una tabla comparativa con rangos y referencias agrupadas por tecnología, sobre la cual se realizó el análisis comparativo para identificar las de mayor potencial de implementación en la Extractora Monterrey.

3.2 Evaluación de estrategias tecnológicas para la remoción de H₂S en biogás

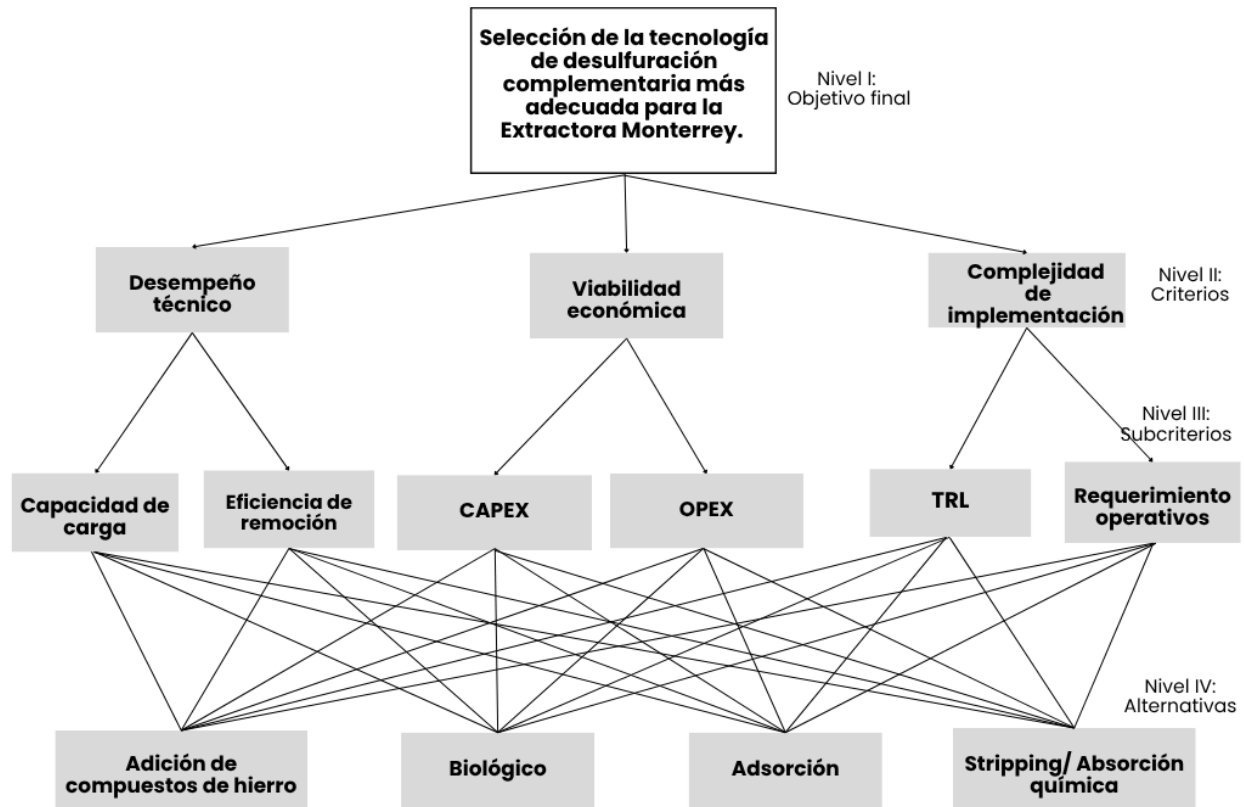
Para seleccionar la tecnología de desulfuración más adecuada para complementar el sistema actual, se aplicó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), metodología desarrollada por Saaty (1980) que descompone la toma de decisiones en una estructura jerárquica y evalúa alternativas mediante comparaciones pareadas, es decir, se comparan dos elementos a la vez asignando un valor numérico que refleja cuánto más importante es uno sobre el otro, lo que convierte preferencias en puntuaciones cuantificables. Dado que la decisión involucra condiciones propias de la planta, las comparaciones se realizaron de forma colaborativa entre el investigador y un operador con experiencia en los biodigestores y generadores de la Extractora Monterrey.

El primer paso de la metodología AHP, consiste en estructurar el modelo en cuatro niveles: (1) objetivo: "Seleccionar la tecnología de desulfuración complementaria más adecuada para la Extractora Monterrey"; (2) Criterios de decisión: se seleccionaron tres, el Desempeño Técnico, Viabilidad Económica y Complejidad de Implementación; (3) subcriterios: capacidad de carga de

H₂S y eficiencia de remoción; costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX); Madurez tecnológica (TRL) y requerimiento operativo, respectivamente; y (4) las tecnologías preseleccionadas en la revisión bibliográfica. La Figura 4 ilustra esta estructura.

Figura 4.

Estructura jerárquica del modelo AHP para la selección de tecnología



El segundo paso del AHP, consistió en realizar una evaluación de los criterios y subcriterios, para esto se diseñó un cuestionario de comparaciones pareadas en Google Forms, respondido por el operador de planta. Se realizaron únicamente las comparaciones necesarias: entre los tres criterios (Desempeño técnico vs. Viabilidad económica, Desempeño técnico vs. Complejidad operativa, Viabilidad económica vs. Complejidad operativa) y entre los subcriterios dentro de cada criterio. Las valoraciones se realizaron con la escala fundamental de Saaty que se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.*Escala fundamental de Saaty*

Escala	Significado
1	Igual importancia
3	Moderadamente más importante
5	Fuertemente más importante
7	Muy fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante
2, 4, 6, 8	Valores intermedios (si no se está seguro entre dos opciones)

Las respuestas se registraron en matrices de comparación en Excel: si un elemento era más importante que otro, se asignaba el valor correspondiente y en la posición inversa su recíproco. El cuestionario y las matrices pueden consultarse en los Apéndices E y F, respectivamente.

En el tercer paso del AHP se calculó los pesos de cada criterio y subcriterio mediante el método del promedio de filas normalizado: se normalizó cada matriz dividiendo cada valor entre la suma de su columna y se promediaron los valores de cada fila, expresando el peso resultante en porcentaje. Estos pesos indican la importancia que tiene cada aspecto en la decisión final. Para asegurar que las respuestas del operador no fueron contradictorias (por ejemplo, decir que A es más importante que B, B más importante que C, pero luego que C es más importante que A), se realizó una prueba de consistencia mediante el cálculo de la razón de consistencia (CR); valores $CR \leq 0,10$ indican juicios confiables; en caso contrario, se revisarían las respuestas con el operador. El procedimiento para el cálculo de los pesos y el CR se presentan en el Apéndice G.

Con los pesos de los criterios y subcriterios ya definidos, el cuarto paso del AHP consistió en la evaluación y puntuación global de cada alternativa, para ello las comparaciones pareadas de

los grupos tecnológicos bajo cada subcriterio fueron realizadas por el investigador a partir de los datos de la tabla de síntesis de la revisión bibliográfica. Para los requerimientos operativos se emplearon tres categorías: bajo (control de parámetros pasivos como presión y flujo), moderado (control de pH, temperatura y mantenimiento de equipos) y alto (control multivariable de pH, temperatura, nutrientes, O₂ y biomasa, con sensibilidad a fluctuaciones de H₂S). Diferencias claras y consistentes entre grupos justificaron valores altos en la escala de Saaty (5, 7 o 9); diferencias menores o con variabilidad, valores moderados (2, 3 o 4). Se construyeron matrices por subcriterio, se calcularon pesos mediante promedio de filas normalizado y se verificó la CR de cada una.

La puntuación global de cada alternativa se obtuvo combinando todos los niveles: primero se multiplicaron los pesos de cada grupo en los subcriterios por los pesos de los subcriterios correspondientes (previamente obtenidos del operador) y se sumaron dentro de cada criterio, obteniendo así la puntuación de cada grupo en desempeño técnico, viabilidad económica y complejidad operativa. Luego, estas puntuaciones se multiplicaron por los pesos de los criterios (también obtenidos del operador) y se sumaron, integrando de forma ponderada las prioridades del operador y las evaluaciones técnicas para identificar el grupo tecnológico con mejor equilibrio global. A partir de los resultados obtenidos mediante el AHP, se formuló la propuesta de una tecnología de remoción de H₂S para la empresa

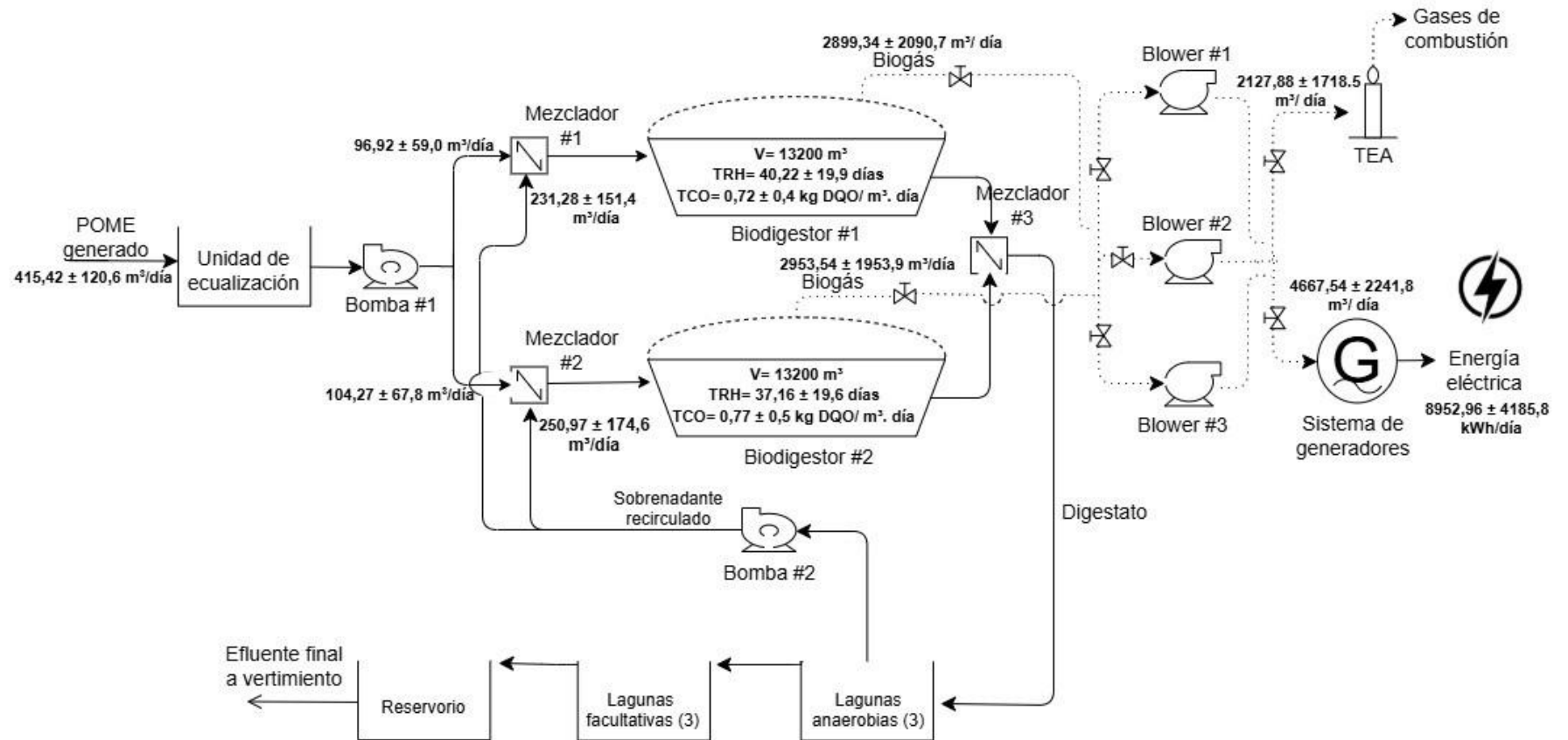
4. Resultados.

4.1 Diagnóstico del estado operativo y estabilidad biológica del sistema

El diagnóstico operativo permite identificar si el H₂S deriva de la operación biológica. En la Figura 5 se muestra el PFD de la planta de Extractora Monterrey.

Figura 5.

PFD del sistema de biodigestión anaerobia de la Extractora Monterrey



La gestión del POME inicia en la unidad de ecualización, que recibe un caudal promedio de $415,42 \pm 120,6$ m³/día. La magnitud de la desviación estándar refleja las fluctuaciones propias del proceso productivo; la ecualización las amortigua para evitar el lavado de biomasa y garantizar una alimentación constante hacia los mezcladores. De este caudal, solo el 48,4% (201,19 m³/día) se deriva a los mezcladores: el mezclador 1 recibe $96,92 \pm 59,0$ m³/día y el mezclador 2, $104,27 \pm 67,8$ m³/día, distribución habitual en biodigestores a gran escala (Tong & Bakar Jaafar, 2006). En los mezcladores, el POME se combina con sobrenadante recirculado en proporción 1:2,4, lo que regula la carga orgánica y aporta alcalinidad al sistema. Cabe señalar que el análisis del postratamiento del digestato, de donde proviene dicho sobrenadante, está fuera del alcance del presente estudio.

Esta configuración: alimentación controlada del 48,4% del POME y recirculación 1:2,4 permite mantener los indicadores de desempeño en rangos recomendados. El TRH es de 37 días (biodigestor 1) y 40 días (biodigestor 2), dentro del rango óptimo de 30–45 días establecido por Hosseini & Wahid (2015). La TCO se sitúa en 0,72 kg DQO/m³·día y 0,77 kg DQO/m³·día, respectivamente, dentro del rango de 0,5–1,5 kg DQO/m³·día recomendado por Metcalf & Eddy (2014) para sistemas anaerobios de baja tasa. Un TRH adecuado evita el lavado de biomasa ante aumentos de caudal, mientras que una TCO controlada previene la sobrecarga orgánica, asegurando una metanogénesis estable. Además, como señalan Poh & Chong (2009), ambos indicadores en rangos seguros minimizan el riesgo de desplazamiento de arqueas metanogénicas por bacterias sulfatorreductoras (BSR), limitando así la generación de H₂S

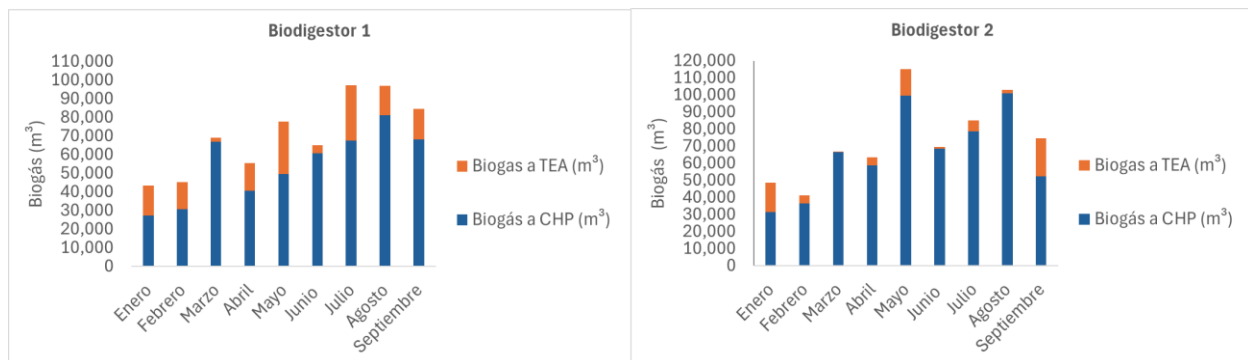
. En cuanto a la producción de biogás, el sistema de dos biodigestores produce en promedio 5.850 m³/día (243,87 m³/h), con un rendimiento específico de 29,1 m³ de biogás por m³ de POME

alimentado, dentro del rango de 25–35 m³/m³ reportado por Althausen (2016) y Sarwani et al. (2019). Este biogás se distribuye entre cogeneración (CHP: 4.667,54 ± 2.241,8 m³/día) y la antorcha de seguridad (TEA: 2.127,88 ± 1.718,5 m³/día), que quema el excedente cuando no puede aprovecharse por razones de calidad, producción excesiva o mantenimiento.

La Figura 6 presenta, para cada biodigestor y durante los nueve meses evaluados, los volúmenes totales de biogás enviados a los motores de generación (CHP) y a la antorcha (TEA).

Figura 6.

Volumen mensual de biogás destinado a CHP y TEA en cada biodigestor



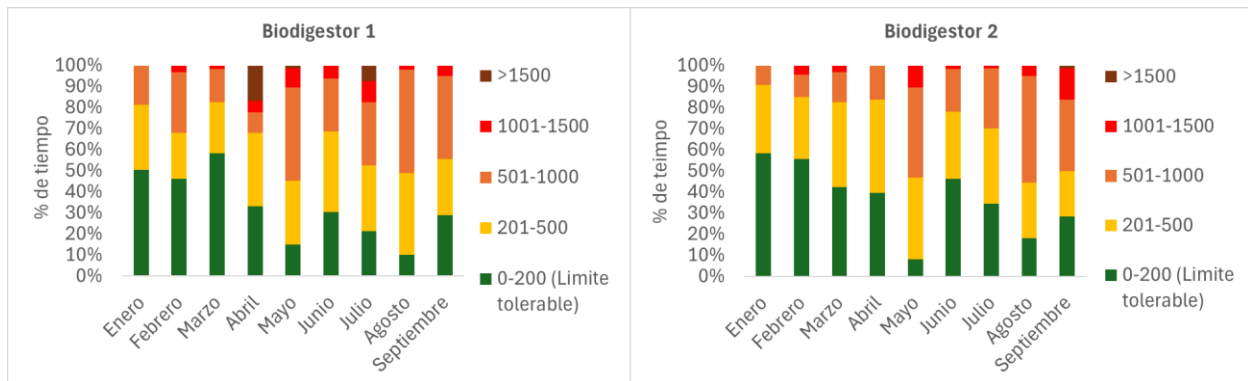
En la Figura 6 se evidencia una alta variabilidad productiva: el pico máximo fue de 97.220 m³ (biodigestor 1, julio) y 115.272 m³ (biodigestor 2, mayo); los mínimos, 43.323 m³ (biodigestor 1, enero) y 41.323 m³ (biodigestor 2, febrero). La eficiencia de aprovechamiento fue máxima en marzo (96,9% y 99,7% para los biodigestores 1 y 2, respectivamente) y mínima en enero, con el mayor desvío a TEA (36,6% y 34,9%). Morelli et al. (2020) establecen que una tasa de quema del 18–20% corresponde a un escenario de bajo rendimiento y del 10% a un escenario base (CHP operando normalmente); los valores de enero duplican o triplican ese umbral, confirmando que la limitante no es la cantidad de biogás producido sino su calidad (concentración de H₂S).

Para gestionar esta limitación, la empresa cuenta con el sistema Awite AwifLEX Cool+, que además de monitorear la composición del biogás cada dos horas, inyecta aire controlado en el

espacio de cabeza de los biodigestores (microaireación), reduciendo parcialmente el H₂S y permitiendo a los operadores identificar ventanas de calidad aceptable para decidir en tiempo real entre CHP y TEA. La Figura 7 presenta, por biodigestor y mes, el porcentaje del tiempo en que el H₂S se ubicó en cada rango, destacando en verde el rango tolerable (0–200 ppm).

Figura 7.

Distribución temporal de la calidad del biogás (H₂S)



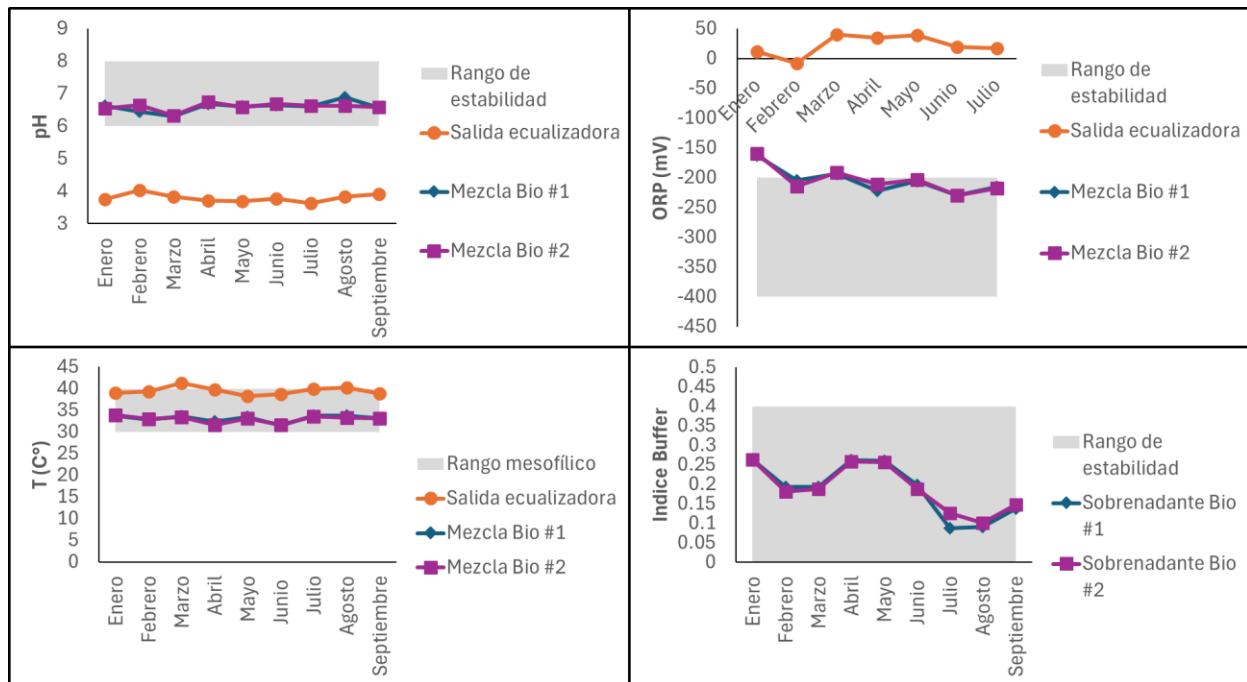
En la Figura 7 se observa que, en marzo, el mes de mayor aprovechamiento, el tiempo en rango tolerable superó el 50% en ambos biodigestores. En enero, aunque fue el mes con mayor desvío relativo a TEA, el tiempo operable fue del 50% (biodigestor 1) y 58% (biodigestor 2): esto indica que los periodos de calidad aceptable se alternan con episodios moderadamente altos (201–500 ppm) y altos (501–1000 ppm) que obligan a detener los motores. En mayo, el tiempo operable cayó por debajo del 15% en ambos biodigestores, coincidiendo con volúmenes elevados de desvío a TEA. Es notable que, si bien la microaireación reduce el H₂S durante fracciones importantes del tiempo en ciertos meses, el análisis horario con AwifLEX revela que persisten ventanas de calidad intermitentes; la operación de los motores debe ajustarse a dichas ventanas, y ante los picos prolongados que la microaireación no puede controlar, se hace necesaria la quema.

Para dimensionar la pérdida energética, se calculó la electricidad potencial del biogás quemado en TEA aplicando el rendimiento operativo real de la planta (1,53 kWh/m³). El volumen

total quemado en los nueve meses (214.916 m³) representó una pérdida potencial de 328.821 kWh, equivalente al 19,8% de la energía efectivamente generada (1.663.933 kWh). Según la UPME, un hogar colombiano promedio consume cerca de 157 kWh/mes; la pérdida equivale al consumo mensual de aproximadamente 2.094 hogares. En términos económicos, asumiendo 700 COP/kWh, la pérdida supera los 229 millones de pesos, esto sin contar la reducción de los costos de mantenimiento correctivo por corrosión. confirmando que la calidad del biogás tiene un impacto cuantificable en la rentabilidad de la empresa.

Para el diagnóstico fisicoquímico se pudo identificar si los microorganismos están inhibidos o si el H₂S persiste por razones ajenas a la operación, orientando así la estrategia de intervención. Cabe señalar que la estabilidad del bioproceso se infiere a partir de las condiciones del sustrato a la entrada de los biodigestores y de la calidad del biogás a la salida, ya que no se dispuso de muestreos directos en el interior de los reactores; para un diagnóstico más preciso de la dinámica interna, sería necesario implementar puntos de muestreo internos en estudios futuros.

La Figura 8 presenta los perfiles de pH, potencial redox (ORP), temperatura e índice buffer(IB) en los puntos P1 (salida de ecualización), P2 y P3 (mezclas de alimentación de los biodigestores). Estos resultados permiten diagnosticar las condiciones de ingreso del sustrato, un factor que, como sostiene Wu et al. (2019), es determinante para la estabilidad del proceso y crucial para identificar variables que favorezcan la formación de H₂S.

Figura 8.*Caracterización fisicoquímica del sustrato alimentado a cada biodigestor*

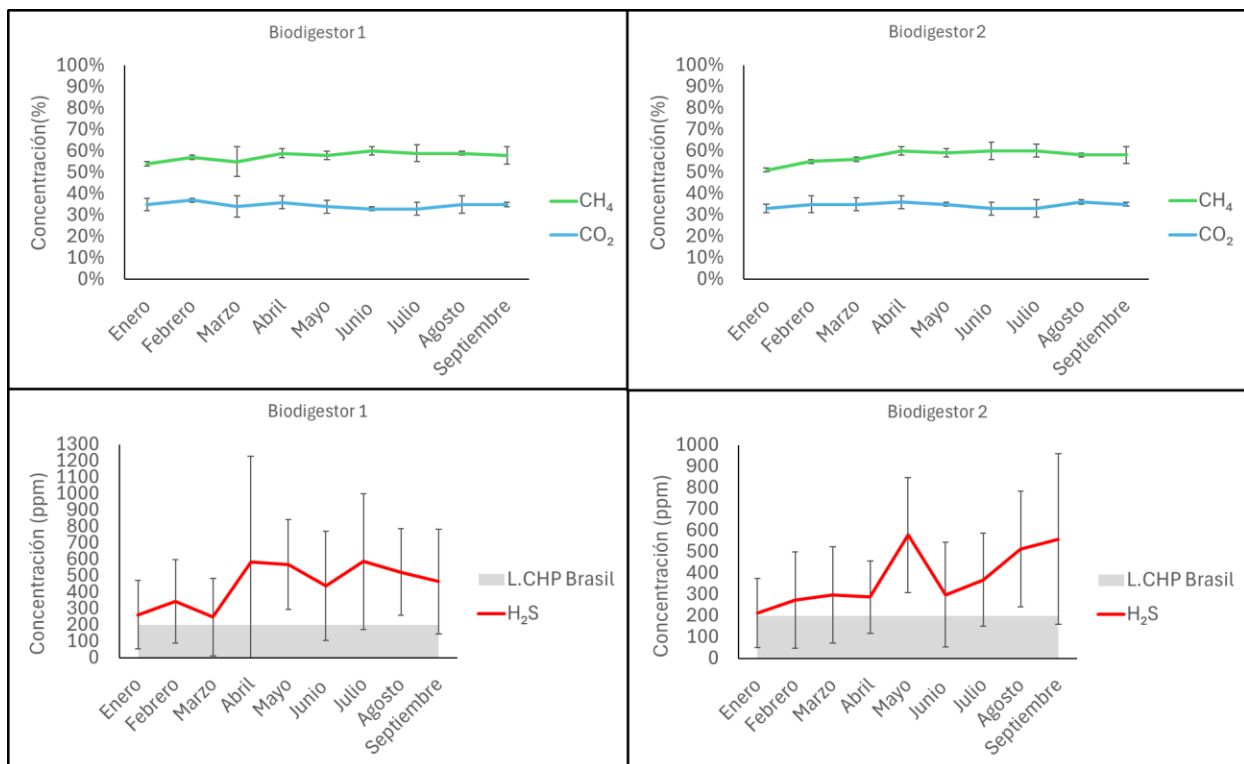
El pH del POME crudo (P1) osciló entre 3,7 y 4,0, valores típicos del efluente, pero fuera del rango de estabilidad (Mohammad et al., 2021); tras el acondicionamiento con sobrenadante, el sustrato de alimentación (P2 y P3) se estabilizó por encima de 6,0. Aunque el óptimo para arqueas metanogénicas es 6,7–7,4 (Cruz-Salomón, 2018), la inhibición severa ocurre principalmente por debajo de 6,0 y por encima de 8,0 (Chen et al., 2011). El índice buffer (Panel D) se mantuvo por debajo de 0,4, límite de CENIPALMA (2023) para prevenir acidificación inminente; valores inferiores a 0,2 sugieren baja disponibilidad de materia orgánica fácilmente degradable en el sobrenadante. La temperatura post-acondicionamiento se estabilizó dentro del rango mesofílico con desviación menor a 1 °C, previniendo choques térmicos que afectarían la cinética enzimática (Appels et al., 2008). Tras un periodo de ajuste inicial, el potencial redox se posicionó entre –200 y –400 mV (Speece, 1983; Gerardi, 2003), confirmando que el sustrato acondicionado es apto para la digestión anaerobia. Esta estrategia de acondicionamiento es coherente con la decisión de

procesar solo el 48,4% del POME, que prioriza la integridad del TRH y evita sobrecargas en la TCO.

Finalmente, para verificar si este entorno preventivo se traduce en una metanogénesis eficiente, se analizó la composición del biogás en las líneas de los biodigestores 1 y 2 (P4 y P5), cuya evolución mensual en términos de CH₄, CO₂ y H₂S se presenta en la Figura 9.

Figura 9.

Composición del biogás (CH₄ y CO₂) y concentración del H₂S



La composición del biogás muestra concentraciones de CH₄ estables entre 50% y 60%, y CO₂ entre 30% y 40%, comportamiento habitual en biogás (Deublein & Steinhauser, 2008) y evidencia de un bioproceso saludable, dado que un sistema bajo estrés metabólico presentaría caídas drásticas de CH₄ con aumento compensatorio de CO₂ (Esteves et al., 2013).

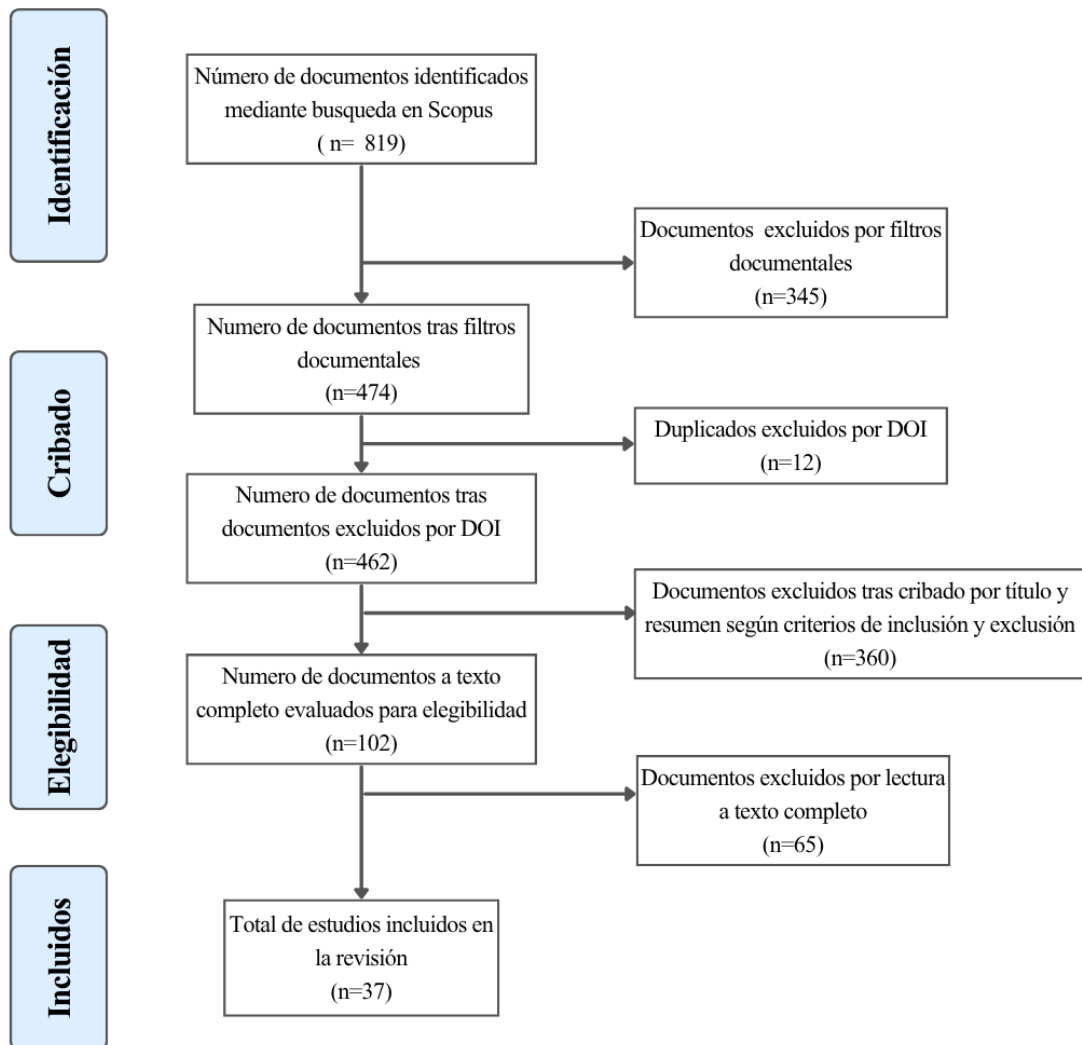
No obstante, El H₂S contrasta con esa estabilidad: los promedios mensuales (213–587 ppm) superan los 200 ppm, pero el análisis horario muestra ventanas dentro del rango; lo que indica que

la superación es frecuente, no total. La dispersión es especialmente notoria en abril para el biodigestor 1, donde la desviación estándar (642 ppm) supera a la media (585 ppm), evidenciando picos agudos; el registro horario reveló un máximo puntual de 2.109 ppm (29 de abril, 11:00 a.m.). Dado que el CH₄ permanece estable en el mismo periodo, la inestabilidad del H₂S no indica una falla estructural del digestor, sino la resiliencia selectiva de las bacterias sulfatorreductoras (BSR), que según Vu et al. (2021) reaccionan de forma inmediata a fluctuaciones menores en el sustrato o el potencial redox sin inhibir la metanogénesis.

4.2 Matriz de alternativas tecnológicas de desulfurización seleccionadas

Con el fin de identificar las tecnologías de remoción de H₂S aplicables al contexto de la Extractora Monterrey, se ejecutó la revisión bibliográfica.

La revisión se llevó a cabo aplicando los criterios de inclusión y exclusión que se detallan en la Figura 10, la cual resume el flujo de documentos a lo largo de las distintas etapas de cribado.

Figura 10.*Diagrama PRISMA del proceso de selección de documentos*

La búsqueda inicial en Scopus arrojó 819 registros, sobre los cuales se aplicaron los filtros automáticos de tipo de documento, año (2015–2026) e idioma (inglés o español), descartando 345 registros. Tras eliminar 12 duplicados por DOI, quedaron 462 documentos sometidos a tamizaje por título y resumen.

En esta fase, los criterios de contenido descartaron 360 documentos: 58 por no describir el mecanismo de remoción (I2), en su mayoría porque presentaban eran mecanismos de control o por menciones sin tecnología asociada, 47 por no centrarse en biogás de digestión anaerobia (I3),

encontrándose gases de procesos como pirolisis, gasificación o biogás sintético, 25 por carecer de datos de desempeño escalables (I4), 224 por no tener al H₂S como contaminante principal (E3), criterio que revela que gran parte de la literatura sobre tratamiento de biogás se enfoca en CO₂, siloxanos, compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco o fosfatos y 6 por concentraciones de H₂S fuera del rango de interés. El criterio E5 (tecnologías no adaptables a la escala de la planta) se reservó para la lectura a texto completo. Resultaron 102 documentos preseleccionados (12,5% de los 819 iniciales).

En la lectura a texto completo se excluyeron 65 documentos adicionales por incumplimiento de I4, E4 y E5, principalmente: modelos predictivos sin tecnología asociada, ausencia de parámetros clave (eficiencia, carga de H₂S, costos), eficiencias de remoción insuficientes para los picos reportados ($\leq 90.5\%$), tecnologías que requerían tres biodigestores en serie o la construcción de un reactor nuevo, y flujos incompatibles con la configuración de la planta. El conjunto definitivo quedó en 37 documentos (4,5% de los 819 iniciales), valor alineado con el rango típico del 3–5% reportado en la literatura metodológica (UCL Library Guides, 2025). De estos documentos emergieron seis grupos tecnológicos: adición de compuestos de hierro, sistemas biológicos, adsorción, absorción química, microaireación y tecnologías electroquímicas.

La Tabla 3 sintetiza cada grupo tecnológico con su principio de funcionamiento, rangos de eficiencia y concentración manejable, condiciones operativas representativas, TRL y costos (CAPEX/OPEX) cualitativos, siguiendo las recomendaciones de la guía SWiM (Campbell et al., 2020).

Cabe destacar la marcada carencia de estudios sobre remoción de H₂S en biogás de POME: la única excepción identificada corresponde al grupo de absorción química (Persson et al., 2021),

que evaluó la codigestión de POME con racimos de frutos vacíos; el resto se basa en sustratos como aguas residuales municipales, estiércol o residuos alimentarios, lo que limita la transferibilidad directa de resultados y subraya la necesidad de validar cualquier tecnología seleccionada en condiciones reales o a escala piloto representativa.

De la Tabla 3 se desprenden los siguientes hallazgos comparativos. Las tecnologías con eficiencias superiores al 95% microaireación (99%), sistemas biológicos (100%), adsorción con carbón activado (99%), absorción química (99%) y sistemas electroquímicos (99%) presentan distintos niveles de madurez: sistemas biológicos y microaireación en TRL 8–9; adsorción y absorción química en TRL 6–7; electroquímica en TRL 4. La adición de compuestos de hierro alcanza también TRL 8–9, pero con eficiencias máximas del 92–93%. En cuanto a costos, las tecnologías biológicas ex situ presentan CAPEX alto y OPEX bajo; la adsorción, CAPEX y OPEX moderados; la absorción química, CAPEX bajo, pero OPEX alto; y la microaireación y la adición de hierro in situ destacan por CAPEX bajo y OPEX moderado. Respecto a los picos de H₂S de la planta (2.109 ppm), todas las tecnologías pueden cubrirlos, excepto la absorción química cuyo rango máximo reportado es de 1.880 ppm; no obstante, estos rangos corresponden a las condiciones experimentales de cada documento, no necesariamente a los límites absolutos de operación.

Tabla 3.

Síntesis de tecnologías de remoción de H₂S

Grupo tecnológico	Principio de funcionamiento	Rango H ₂ S manejado	Eficiencia de remoción	Condiciones operativas	TRL(Madurez tecnológica)	Costos de capital/operación (CAPEX/OPEX)	Referencias (Nº)
1. Microaireación / Micro-oxigenación	Inyección controlada de O ₂ o aire en el espacio de cabeza o la fase líquida del digestor. Las bacterias oxidadoras de azufre (SOB) presentes en el lodo oxidan el H ₂ S a azufre elemental (S ⁰) o sulfato (SO ₄ ²⁻) dentro del mismo reactor, evitando su transferencia al biogás.	100-4000 ppm	74-99%	En general se utilizan dosis de aire: 1-3% del caudal de biogás. Inyección preferiblemente en espacio de cabeza o recirculación de lodos (Pokorna-Krayzelova et al., 2017). Relación O ₂ /S ²⁻ : 0.6-1.0. pH ~7.0. Temperatura mesofílica o termofílica. Riesgo de explosión si O ₂ >4% en mezcla gaseosa. Dilución de metano por nitrógeno mínima (≤2%, Jeniček et al., 2017).	8-9	CAPEX bajo. OPEX moderado limitado al costo eléctrico del soplador.	(Ullah et al., 2025) (Abbassi-Guendouz et al., 2026) (Muller et al., 2022) (Lau et al., 2020) (Huertas et al., 2020) (Choudhury et al., 2019) (Jeniček et al., 2017) (Pokorna-Krayzelova et al., 2017) (Ruan et al., 2017) (Sousa et al., 2016) (Díaz & Fdz-Polanco, 2012)
2. Adición de compuestos de hierro	Adición de sales férricas (FeCl ₃ , FeCl ₂), óxidos de hierro (Chatarra oxidada), polvo de hierro o lodos residuales con contenido de Fe al digestor o a la corriente de alimentación. El Fe ²⁺ /Fe ³⁺ reacciona con el sulfuro disuelto (S ²⁻) precipitándolo como FeS o FeS ₂ insoluble, lo que impide su volatilización hacia el biogás. Como efecto secundario, remueve fósforo.	450-4000 ppm	70-95%	Sales férricas (FeCl₃, FeCl₂): Dosis 24-105 mg/L en línea de alimentación o espesador; pH estable ~7.2 (Erdirencelebi & Kucukhemek, 2018). Polvo de hierro: En semicontinuo, HRT 10-20 días (Oh et al., 2024). Chatarra oxidada: Requiere renovación periódica del material y mantenimiento frecuente para mantener Fe ₂ O ₃ activo. Lodos residuales: Adición directa al digestor; trata hasta 8 000 m ³ de biogás (Persson et al., 2021).	8-9	CAPEX bajo en todos los formatos. OPEX moderado depende del costo del reactivo.	(Oh & Ahn., 2024) (Oh et al., 2024) (Persson et al., 2021) (Parker et al., 2020) (Erdirencelebi & Kucukhemek, 2018) (Ruan et al., 2017)
3. Biológico	Oxidación biológica del H ₂ S mediante consorcios microbianos especializados operados fuera del digestor o en zonas diferenciadas del reactor. Dentro de los sistemas reportados se incluyen: biofiltros de goteo (BTF) con bacterias oxidadoras de azufre (SOB) aerobios (inyección de aire) o anóxicos (con NO ₃ como aceptor de electrones), fotobiorreactores con bacterias fototróficas anoxigénicas (Chlorobium, bacterias púrpuras) y biorreactor de membrana de fibra hueca (HFMB) . Todos oxidan el H ₂ S a S ⁰ o SO ₄ ²⁻ sin diluir el biogás con nitrógeno.	500-5000 ppm	74-100%	BTF: pH 6.5-7.5; Tiempo de residencia del gas (EBRT) 30-180 s; empaque plástico; inyección de aire 12-15% (aerobio) o NO ₃ como aceptor (anóxico). BTF #2: Ambiente ácido (pH 1.5-3.5), temperatura de 35-36 °C, adición de aire (1.5-3.5%) con relación O ₂ /H ₂ S de 2/1. (Arıman & Koyuncu, 2022) HFMB: Membrana de polipropileno, NO ₃ como aceptor, pH 7.5; evita espumado y arrastre de biomasa (Das et al., 2022). Fotobiorreactor: Luz infrarroja o blanca, HRT 4 días, pH 6.8 (Egger et al., 2023).	8-9	CAPEX alto (requiere reactor externo, relleno, sistema de bombeo). OPEX bajo	(Severi et al., 2025) (Egger et al., 2023) (Das et al., 2022) (Cheng et al., 2018) (Vikromvarasiri et al., 2017) (De Luca et al., 2017) (Timothy et al., 2019) (Arıman & Koyuncu, 2022)

4. Adsorción	<p>Retención del H₂S sobre materiales porosos mediante adsorción física, quimisorción y/u oxidación catalítica superficial. Dentro de los materiales utilizados, se incluyen: biochar de diversas biomásas (hojas, madera de arce, rastrojo de maíz, fibras de DA), carbón activado granular (GAC) comercial, carbón activado (CA) regenerado y biochar impregnado con FeCl₃ (mecanismo mixto adsorción-oxidación catalítica). El biochar también puede actuar in situ vía DIET (Transferencia Directa de Electrones entre Especies), reduciendo la producción de H₂S al desviar electrones de las bacterias sulfato-reductoras (SRB).</p>	50-3000 ppm	81-99%	<p>Biochar: pirólisis a 450-800°C; biogás preferiblemente seco (humedad compite por poros); pH alcalino (>8) favorece quimisorción; temperatura ambiente (25°C) (Vuppaladadiyam et al., 2024). Biochar+Fe: impregnación con FeCl₃; la humedad en el gas es crítica para la oxidación catalítica a S⁰; la capacidad es 3.9-7.2 veces superior al biochar virgen (Choudhury & Lansing, 2021). GAC: adsorbente comercial en columna de 50 L; capacidad cae de 979 a 668 g/kg al aumentar la concentración de entrada (Ou et al., 2020). CA regenerado: temperatura de regeneración 200-500°C en atmósfera de N₂; capacidad disminuye con ciclos sucesivos (Coppola & Papurello, 2019). DIET: in situ, compite electrones con SRB favoreciendo la metanogénesis (Tsui et al., 2022).</p>	6-7	<p>CAPEX Bajo, si se usa residuos, OPEX moderado</p>	<p>(Vuppaladadiyam et al., 2024) (Aller et al., 2023) (Tsui et al., 2022) (Choudhury & Lansing, 2021) (Ou et al., 2020) (Coppola & Papurello., 2019) (Ayiania et al., 2019) (Sahota et al., 2018)</p>
5. Electroquímico / Bio-electroquímico	<p>Oxidación electroquímica del sulfuro mediante celdas con electrodos sumergidos. Se identifican dos variantes: (a) electrodos bio-electroquímico (BEC), en este, el ánodo (Fe sacrificial) oxida el S²⁻ mientras el cátodo (grafito) favorece la electrometanogénesis. (b) electrodos convencionales, utilizan un voltaje externo a electrodos de tela de carbono o acero inoxidable, con esto el H₂S disuelto se oxida directamente en la superficie del ánodo, transformándose en azufre elemental o sulfato.</p>	800-3200 ppm	89-99%	<p>Electrodos BEC: Voltaje aplicado: 0.8 V; HRT: 20 días; también remueve N y P del digestato (Aguirre-Villegas et al., 2025). Electrodos convencionales: Voltaje aplicado: 3.0 V, se usa tela de carbono (mayor actividad catalítica, mayor costo) o acero inoxidable; se realiza a temperatura mesofílica; La tela de carbono demostró mayor actividad catalítica pero menor costo-beneficio que el acero inoxidable.</p>	4	<p>CAPEX alto (costo de electrodos). OPEX: alto, consumo eléctrico continuo + reposición de ánodos sacrificiales de Fe</p>	<p>(Rani et al., 2025) (Aguirre-Villegas et al., 2025) (Lin et al., 2016)</p>
6. Stripping / Absorción química	<p>Remoción del H₂S por contacto del biogás con un solvente líquido reactivo en sistemas externos al digestor. Se identifican tres variantes: (a) absorción con solución de hierro quelatado regenerable continuamente con aire; (b) columna de absorción con NH₃ acuoso derivado del propio digestato, que también remueve >90% de CO₂. Las tres variantes pueden producir subproductos valorizables.</p>	200-1880 ppm	84-99%	<p>Quelato-Fe: sistema de membrana espiral, regeneración continua con aire, piloto 30 m³/h (Park, 2021). NH₃ acuoso: columna de 3.5 m de altura, 25°C, 1 bar; el H₂S reacciona con el NH₃ formando sales de amonio reutilizables como fertilizante líquido (Adnan et al., 2020). Las tres variantes operan a temperatura ambiente o moderada.</p>	6-7	<p>CAPEX alto. OPEX: moderado</p>	<p>(Park., 2021) (Adnan et al., 2020)</p>

Al comparar tecnologías *in situ* (microaireación, adición de hierro) frente a *ex situ* (biológicas, adsorción, absorción), las primeras presentan menor inversión inicial, pero su eficiencia depende del tipo de reactor. En lagunas cubiertas con dinámica hidráulica distinta a los tanques agitados, reportados en la literatura, su desempeño podría ser inferior al esperado. Por su parte las tecnologías *ex situ* son independientes del tipo de digestor y ofrecen mayor control y consistencia, aunque con mayor CAPEX o OPEX.

Dos grupos fueron descartados antes del proceso de selección. La microaireación tecnología que como se describe en el diagnóstico operativo opera en la planta (equipo Awite AwiFLEX Cool+); en vista de que el objetivo es identificar una tecnología complementaria que garantice $\text{H}_2\text{S} \leq 200$ ppm, no evaluar la existente. Los sistemas electroquímicos se descartaron por baja madurez tecnológica (TRL 4), ausencia de pruebas a escala piloto o real, y limitaciones de escalabilidad por los altos costos de electrodos y la complejidad del sistema (Rani et al., 2025).

Entre las cuatro tecnologías restantes, los hallazgos más relevantes son los siguientes. En adición de compuestos de hierro, el uso de lodos de potabilización (óxido férrico natural) en 13 plantas a gran escala logró ahorros del 50% frente al cloruro férrico virgen, reduciendo el H₂S a <100 ppm por tonelada de lodo (15% ST) en 3.000 Nm³ de biogás (Persson et al., 2021). En sistemas biológicos *ex situ*, el biofiltro de goteo (biotrickling filter) destaca: Cheng et al. (2018) redujeron el H₂S de 3.000 ppm a <200 ppm (>93%) sin afectar el metano (62%); Ariman & Koyuncu (2022) por su parte, reportaron 99% de eficiencia tratando hasta 4.400 ppm en condiciones ácidas (pH 1,5–3,5), demostrando alta robustez ante fluctuaciones. En adsorción, el carbón activado alcanzó eficiencias del 99% a escala piloto (de 2.500 ppm a valores muy cercanos a 0 ppm), aunque requiere secado previo del biogás, pues la humedad reduce drásticamente su capacidad (Coppola & Papurello, 2019). En absorción química, la mayoría de los estudios se

orienta a producción de biometano (>80% CH₄), que excede el rango recomendado para generadores; no obstante, el estudio con POME y quelato de hierro (II) logró una remoción >99% a escala piloto (reactores de 1 m³), siendo el único que trabaja directamente sobre el sustrato objetivo (Park, 2021).

4.3 Selección de la estrategia tecnológica mediante el análisis jerárquico (AHP)

Con el fin de seleccionar la tecnología complementaria más adecuada para la Extractora Monterrey, se realizó un análisis multicriterio mediante la metodología AHP. En la Tabla 4 se presentan los pesos obtenidos para los criterios y subcriterios de evaluación, los cuales establecen la jerarquía de prioridades para la selección tecnológica.

Tabla 4.

Pesos de criterios y subcriterios de evaluación

Criterio	Peso (%)	Subcriterio	Peso (%)
Desempeño técnico	65%	Eficiencia de remoción	80%
		Capacidad de carga de H₂S	20%
Viabilidad económica	12%	CAPEX	17%
		OPEX	83%
		TRL	83%
Complejidad de implementación	23%	Requisitos operativos	17%

El Desempeño técnico concentra el 65% del peso total, reflejando que la capacidad de reducir el H₂S es la prioridad principal. Dentro de este criterio, la eficiencia de remoción (80%) predomina sobre la capacidad de carga de H₂S (20%), lo que es coherente con el sistema actual: gracias a la microaireación, la tecnología complementaria no necesitaría manejar cargas muy elevadas, sino garantizar reducciones profundas ante los picos ocasionales. La Viabilidad económica pesa un 12%, con predominio del OPEX (83%) sobre el CAPEX (17%), reflejando la mayor preocupación por los gastos recurrentes que por la inversión inicial. La Complejidad

operativa recibió un 23%, siendo el TRL (83%) el subcriterio dominante frente a los requerimientos operativos (17%), lo que indica que la empresa prioriza tecnologías probadas y confiables. La razón de consistencia (CR) de la matriz de criterios fue de 0,003, muy por debajo del límite aceptable de 0,10, confirmando la coherencia de los juicios del operador.

Con los pesos de los criterios y subcriterios de evaluación ya definidos, se pasó a evaluar las tecnologías, para ello se determinaron los pesos relativos de cada grupo tecnológico en cada subcriterio.

En la Tabla 5 se presentan los pesos locales obtenidos por cada alternativa en cada subcriterio evaluado.

Tabla 5.

Pesos locales de los grupos tecnológicos por subcriterios (%)

	Eficiencia	Capacidad de carga	CAPEX	OPEX	TRL	Requerimientos operativos
Adición de compuestos de hierro	4.92%	35.48%	50.77%	16.67%	43.75%	58.66%
Biologico	44.42%	51.94%	4.99%	50.00%	43.75%	5.14%
Adsorción	25.33%	8.65%	30.11%	16.67%	6.25%	23.33%
Absorción biológica	25.33%	3.93%	14.12%	16.67%	6.25%	12.87%

Los resultados muestran que ninguna tecnología domina todos los factores, sino que cada una sobresale en subcriterios opuestos. . El sistema biológico lidera en eficiencia de remoción (44,42%), capacidad de carga de H₂S (51,94%) y OPEX (50,00%), pero presenta restricciones en CAPEX (4,99%) y requerimientos operativos (5,14%), evidenciando alta inversión inicial y mayor exigencia de supervisión técnica. La adición de compuestos de hierro sobresale en viabilidad inmediata: lidera en CAPEX (50,77%), simplicidad operativa (58,66%) y comparte el liderazgo en TRL (43,75%) con el sistema biológico, compensando su baja eficiencia relativa (4,92%) con fácil integración a la infraestructura actual. La adsorción y la absorción química presentan perfiles intermedios: ambas alcanzan 25,33% en eficiencia, con limitaciones en capacidad de carga (8,65%

y 3,93%, respectivamente) y TRL (6,25%). Las CR de cada subcriterio fueron: 0,014 (eficiencia), 0,085 (capacidad de carga), 0 (CAPEX), 0 (OPEX), 0 (TRL) y 0,014 (requerimientos operativos), todos por debajo de 0,10. La Tabla 6 consolida la prioridad global de cada alternativa, combinando los pesos locales con la importancia relativa de criterios y subcriterios.

Tabla 6.

Resultados de la priorización tecnológica global(%)

Grupo tecnológico	Peso global (%)
Adición de compuestos de hierro	20.51%
Biológico	43.52%
Adsorción	18.65%
Absorción biológica	17.32%

El mecanismo biológico (43,52%) se consolida como la alternativa más viable, impulsado por su dominio en el subcriterio de mayor peso (eficiencia de remoción), su alta capacidad de carga y el mejor desempeño en OPEX, factor que representa el 83% de la importancia económica. La adición de compuestos de hierro (20,51%) queda en segunda posición: aunque destaca en simplicidad y bajo CAPEX, la evaluación prioriza la sostenibilidad del gasto operativo y la capacidad de procesar altas cargas sobre la facilidad de implementación inmediata. La adsorción (18,65%) y la absorción química (17,32%) cierran el ranking, con ventajas en eficiencia que se ven anuladas por sus limitaciones financieras o de capacidad de carga.

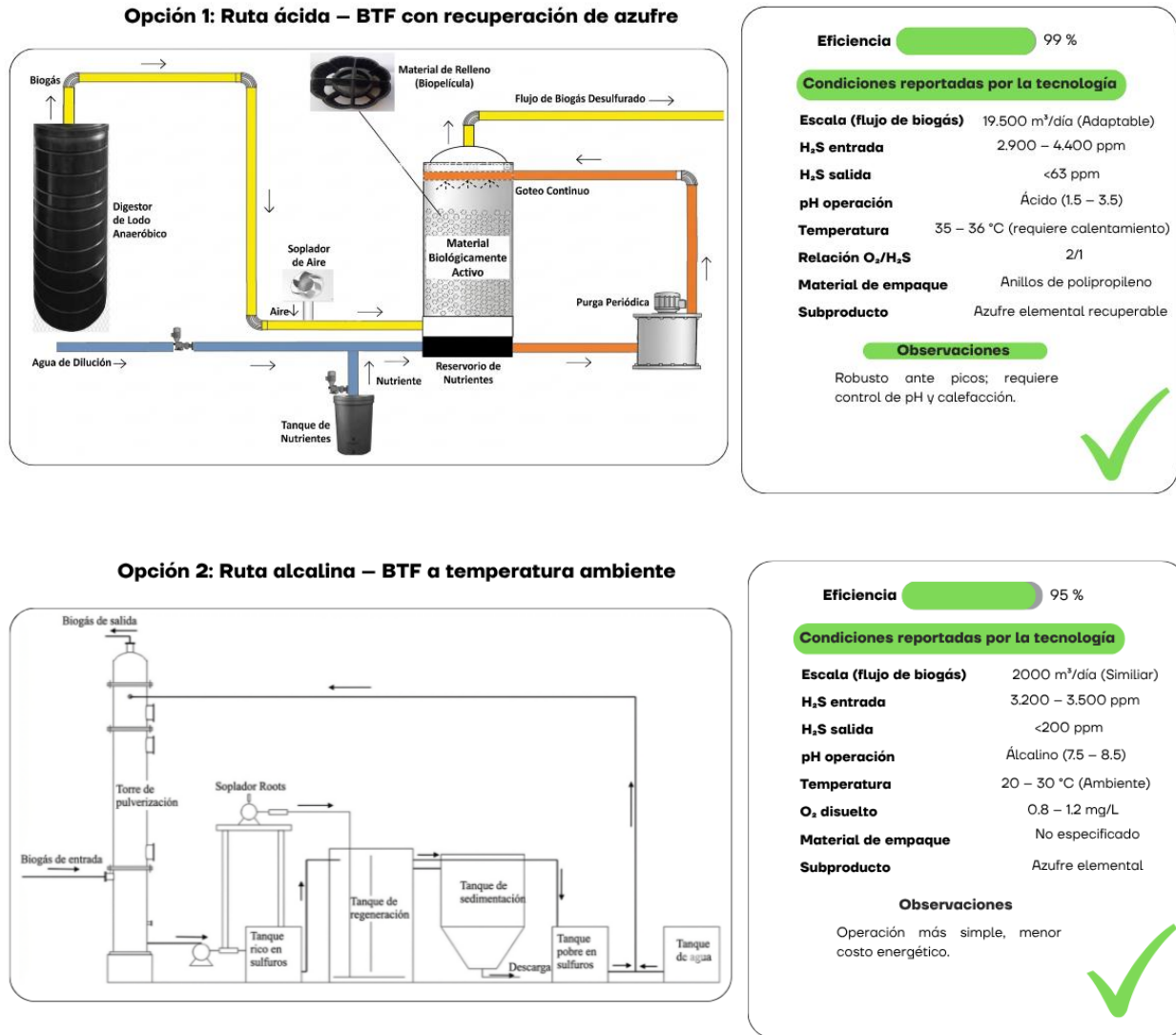
4.3.1 Propuesta preliminar de implementación tecnológica

Con base en el diagnóstico operativo y el análisis AHP, se propone complementar el sistema de microaireación actual con una tecnología del grupo biológico, específicamente un biofiltro de goteo (biotrickling filter), que destacó por su equilibrio entre alta capacidad de carga, bajo OPEX y alta madurez tecnológica (TRL 8–9). La Figura 11 ilustra dos configuraciones a

escala real respaldadas por estudios de alta calidad (Ariman & Koyuncu, 2022; Cheng et al., 2018), ambas con eficiencias superiores al 95% y capacidad para manejar concentraciones de H₂S muy superiores a los picos registrados en la planta.

Figura 11.

Propuestas tecnológicas de remoción de H₂S



Nota. Adaptado de Ariman & Koyuncu (2022) y Severi et al. (2025).

La Opción 1 (ruta ácida) ofrece la máxima eficiencia (99%) y la posibilidad de recuperar azufre elemental, pero requiere control estricto de pH y calentamiento del sistema. La Opción 2 (ruta alcalina a temperatura ambiente), aunque con una eficiencia ligeramente menor (95%), presenta ventajas operativas significativas para el contexto de la planta: no necesita calefacción, opera a pH cercano al neutro y tiene menores requerimientos energéticos. Dado el clima tropical de la zona (temperaturas ambiente estables entre 25–30 °C), se recomienda priorizar la Opción 2 como base para la prueba piloto, sin descartar que en una fase posterior se evalúe la ruta ácida si la empresa muestra interés en la recuperación de azufre como subproducto. Los resultados del piloto permitirán ajustar los parámetros operativos (caudal de biogás, relación O₂/H₂S, frecuencia de riego) a las condiciones específicas de la Extractora Monterrey.

5. Conclusiones

- El sistema de biodigestión de la Extractora Monterrey opera con un TRH de 37–40 días y TCO de 0,72–0,77 kg DQO/m³·día, dentro de los rangos recomendados para digestión anaerobia. Esta estabilidad, sostenida por la alimentación controlada del 48,4% del POME y la recirculación 1:2,4, se traduce en un bioproceso saludable con CH₄ estable (50–60%). Sin embargo, el H₂S supera frecuentemente el límite de 200 ppm del fabricante con picos de hasta 2.109 ppm, confirmando que el problema no es una falla del bioproceso sino la resiliencia selectiva de las bacterias sulfatorreductoras, ante la cual la microaireación existente resulta insuficiente.
- La revisión bibliográfica en Scopus identificó, a partir de 36 documentos seleccionados, seis grupos tecnológicos con potencial de remoción de H₂S en biogás de digestión anaerobia: adición de compuestos de hierro, sistemas biológicos ex situ, adsorción, absorción química, microaireación y tecnologías electroquímicas, además la escasa literatura especializada en POME como sustrato

subraya la necesidad de validar cualquier tecnología a escala piloto antes de su implementación definitiva.

- La evaluación multicriterio AHP identificó al mecanismo biológico ex situ como la tecnología complementaria más adecuada (puntuación global: 43,52%), por su balance entre alta eficiencia de remoción (>95%), capacidad para manejar los picos registrados, bajo OPEX y alta madurez tecnológica (TRL 8–9).
- La estrategia tecnológica más efectiva para mantener el H₂S dentro de los límites operativos del fabricante consiste en complementar la microaireación actual con un biofiltro de goteo en ruta alcalina a temperatura ambiente, aprovechando las condiciones climáticas tropicales de Puerto Wilches (25–30 °C). Su implementación permitiría recuperar una pérdida estimada en 255.866 kWh y más de 229 millones de COP, aumentar la continuidad operativa de los generadores y reducir los costos de mantenimiento correctivo por corrosión.

6. Recomendaciones

- Se recomienda implementar una prueba piloto del biofiltro de goteo en ruta alcalina antes de escalar la solución, con el fin de ajustar los parámetros operativos: caudal de biogás, relación O₂/H₂S y frecuencia de riego a las condiciones específicas de la planta. Los resultados del piloto deben emplearse para dimensionar el sistema definitivo.
- Establecer puntos de muestreo en el interior de los biodigestores para complementar el diagnóstico fisicoquímico. El presente estudio infirió la estabilidad interna a partir de las condiciones de entrada y salida(biogás); muestreos directos dentro de los reactores permitirían caracterizar con mayor precisión la dinámica de las bacterias sulfatorreductoras y optimizar la estrategia de control.

- Evaluar la ruta ácida del biofiltro de goteo en una fase posterior, si la empresa muestra interés en la recuperación de azufre elemental como subproducto comercializable, dado que esta configuración reporta eficiencias del 99% y podría generar un ingreso adicional.

Referencias Bibliográficas

- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J. P., Steyer, J. P., & Escudíe, R. (2026). Micro-aeration strategy for improved biogas yield and in-situ hydrogen sulfide mitigation during high-solids co-digestion of poultry litter. *Bioresource Technology*, 439, Artículo 133399. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.174>
- Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2020). Upgrading of biogas by utilizing aqueous ammonia and the alkaline effluent from air-stripping of anaerobically digested animal manure. Application on the design of a semi-industrial plant unit. *Journal of Water Process Engineering*, 36(4), Artículo 101318. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
- Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., Rakobitsch, N., Wattiaux, M. A., & Silva, E. (2025). Bio-electrochemically assisted sulfide, phosphorus, and nitrogen remediation in continuous anaerobic digestion of dairy manure with improved biogas production. *Chemosphere*, 376, Artículo 144288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132390>
- Aller, D., Bakshi, S., & Laird, D. A. (2023). Coupling a biochar filter to a leach bed reactor for anaerobic digestion of chicken litter. *Bioresource Technology Reports*, 21, Artículo 101362. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012>
- Althausen, M. (2016). Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio: Convertir un residuo en un recurso. *Palmas*, 37(Especial Tomo II), 31–37.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). APHA Press.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Appels, L., Baeyens, J., Degève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Arıman, S., & Koyuncu, S. (2022). Removal of hydrogen sulfide in biogas from wastewater treatment sludge by real-scale biotrickling filtration desulfurization process. *Water Practice and Technology*, 17(7), 1406–1420. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.072>
- Ayiania, M., Carbajal-Gamarra, F. M., Garcia-Perez, T., Frear, C., Suliman, W., & Garcia-Perez, M. (2019). Production and characterization of H₂S and PO₄³⁻ carbonaceous adsorbents from anaerobically digested fibers. *Biomass and Bioenergy*, 120, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.028>
- Bailón Allegue, L., & Hinge, J. (2012). *Biogas upgrading: Evaluation of methods for H₂S removal*. Danish Technological Institute.

https://www.teknologisk.dk/_media/60599_Biogas+upgrading.+Evaluation+of+methods+for+H2S+removal.pdf

- Campbell, M., McKenzie, J. E., Sowden, A., Katikireddi, S. V., Brennan, S. E., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V., & Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: reporting guideline. *BMJ*, 368, Artículo l6890. <https://doi.org/10.1136/bmj.l6890>
- CENIPALMA. (2023). Manual de laboratorio para la caracterización, seguimiento y control de variables fisicoquímicas en las aguas utilizadas y generadas como subproductos en la extracción y procesamiento del aceite de palma. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite – Fedepalma.
- Chen, T., Zheng, P., Shen, L., Ding, S., & Mahmood, Q. (2011). Kinetic characteristics and microbial community of Anammox-EGSB reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.012>
- Cheng, Y., Yuan, T., Deng, Y., Lin, C., Zhou, J., Lei, Z., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2018). Use of sulfur-oxidizing bacteria enriched from sewage sludge to biologically remove H₂S from biogas at an industrial-scale biogas plant. *Bioresource Technology Reports*, 3(4), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.01.006>
- Choudhury, A., & Lansing, S. (2021). Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), Artículo 104837. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837>
- Choudhury, A., Shelford, T., Felton, G., Gooch, C., & Lansing, S. (2019). Evaluation of Hydrogen Sulfide Scrubbing Systems for Anaerobic Digesters on Two U.S. Dairy Farms. *Energies*, 12(24), Artículo 4605. <https://doi.org/10.3390/en12244605>
- CHP Brasil. (s.f.). Manual de operación y mantenimiento: Unidad de generación biogás 1000 kW (Grupo Generador CHP400 - V1.0). Scribd. <https://es.scribd.com/document/783465390/MANUAL-DE-OPERACION-Y-MANTENIMIENTO-GENERACION-ESTERO>
- Coppola, G., & Papurello, D. (2019). Biogas Cleaning: Activated Carbon Regeneration for H₂S Removal. *Clean Technologies*, 1(1), 40–57. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol1010004>
- Cruz Salomón, A. (2018). Design and evaluation of EGSB bioreactors for the treatment of agro-industrial wastewaters of the state of Chiapas (Doctoral dissertation). University of Science and Arts of Chiapas. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/profile/Abumale-Cruz-Salomon/>
- Das, J., Nolan, S., & Lens, P. N. L. (2022). Simultaneous removal of H₂S and NH₃ from raw biogas in hollow fibre membrane bioreactors. *Environmental Technology & Innovation*, 28, Artículo 102777. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102777>

- De Luca, E., Fiocchetti, F., Rosa, S., Aliboni, A., Lona, L., Corsaro, N., & Felici, C. (2017). A novel photobioreactor system for hydrogen sulphide biogas clean-up. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 14(1-2), 125–142. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2017.081100>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An introduction*. Wiley-VCH.
- Díaz, I., & Fdz-Polanco, M. (2012). Robustness of the microaerobic removal of hydrogen sulfide from biogas. *Water Science and Technology*, 65(8), 1368–1374. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.013>
- Díaz, I., Lopes, A. C., Pérez, S. I., & Fdz-Polanco, M. (2011). Determination of the optimal rate for the microaerobic treatment of several H₂S concentrations in biogas from sludge digesters. *Water Science and Technology*, 64(1), 233–238. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.648>
- Egger, F., Hülsen, T., & Batstone, D. J. (2023). Continuous H₂S removal from biogas using purple phototrophic bacteria. *Chemical Engineering Journal*, 454, Artículo 140449. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140449>
- Erdirencelebi, D., & Kucukhemek, M. (2018). Control of hydrogen sulphide in full-scale anaerobic digesters using iron (III) chloride: Performance, origin and effects. *Water SA*, 44(2), 231–238. <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i2.04>
- Esteves, S., Miltner, M., & Puchas, K. (2013). *Monitoring review and guide for the optimisation of anaerobic digestion and biomethane plants: Full report*. University of Glamorgan.
- Fedepalma. (2025). *Minianuario Estadístico 2025*. <https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/155172/Mini%20Anuario%20Estad%20C3%ADstico%2032%20%282025%29.pdf?sequence=8>
- Freitas, B. de O., & Daniel, L. A. (2023). A new anaerobic, aerobic, nitrification, anoxic reactor (AANAR) with overlaid biological zones: Sulfide removal from wastewater and biogas. *Chemical Engineering Journal*, 452, Artículo 139255. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139255>
- Gerardi, M. H. (2003). Bacteria. En *The microbiology of anaerobic digesters* (pp. 11–16). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471468967.ch2>
- Haryanto, A., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Telaumbanua, M., Triyono, S., & Hidayat, W. (2021). Biomass fuel from oil palm empty fruit bunch pellet: Potential and challenges. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(1), 33–42.
- Hosseini, S. E., & Abdul Wahid, M. (2015). Pollutant in palm oil production process. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(7), 773–781. <https://doi.org/10.1080/10962247.2013.873092>
- Huertas, J. K., Quipezco, L., Hassanein, A., & Lansing, S. (2020). Comparing Hydrogen Sulfide Removal Efficiency in a Field-Scale Digester Using Microaeration and Iron Filters. *Energies*, 13(18), Artículo 4793. <https://doi.org/10.3390/en13184793>

- Jarzębowicz, A., & Weichbroth, P. (2021). A systematic literature review on implementing non-functional requirements in agile software development: Issues and facilitating practices. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67084-9_6
- Jeníček, P., Horejš, J., Pokorná-Krayzelová, L., Bindzar, J., & Bartáček, J. (2017). Simple biogas desulfurization by microaeration – Full scale experience. *Anaerobe*, 46, 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.01.002>
- Lau, C. Y., Guan, J., Tse, H. Y., Yeung, C. S., & Leu, S. Y. (2020). Smart control for micro-aeration toward sulfide removal in sewer systems at low costs. *Desalination and Water Treatment*, 200, 369–375. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26117>
- Lens, P. N. L., Visser, A., Janssen, A. J. H., Pol, L. W. H., & Lettinga, G. (1998). Biotechnological treatment of sulfate-rich wastewaters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(1), 41–88.
- Li, D., Ran, Y., Chen, L., Cao, Q., Li, Z., & Liu, X. (2018). Instability diagnosis and syntrophic acetate oxidation during thermophilic digestion of vegetable waste. *Water Research*, 139, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.019>
- Lin, H., Williams, N., King, A., & Hu, B. (2016). Electrochemical sulfide removal by low-cost electrode materials in anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 297, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.086>
- Mankins, J. C. (2009). Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, 65(9–10), 1216–1223. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review. *Processes*, 9(5), Artículo 739. <https://doi.org/10.3390/pr9050739>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *BMJ*, 339, Artículo b2535. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2013). *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons.
- Morelli, B., Cashman, S., Ma, X. C., Turgeon, J., Arden, S., & Garland, J. (2020). Environmental and cost benefits of co-digesting food waste at wastewater treatment facilities. *Water Science and Technology*, 82(2), 227–241. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.104>
- Muller, C., Guevarra, K., Summers, A., Pierce, L., Shahbaz, P., Zemke, P. E., Woodland, K., Hollingsworth, V., Nakhla, G., Bell, K., & Bronstad, E. (2022). A review of the practical application of micro-aeration and oxygenation for hydrogen sulfide management in

- anaerobic digesters. *Process Safety and Environmental Protection*, 165, 126–137.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.009>
- Muyzer, G., & Stams, A. (2008). The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, 6(6), 441–454. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1892>
- Oh, S. J., Ha, S. H., Noh, E. J., Shin, S. G., & Ahn, J. H. (2024). Effect of iron powder on hydrogen sulfide reduction and phosphate removal in semi-continuous anaerobic digestion treating primary sludge. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 99(4), 893–901.
<https://doi.org/10.1002/jctb.7594>
- Ortiz, Y. A. (2019). La palma de aceite como ejemplo para la agroindustria en Colombia (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/cf31ef31-4ca8-4459-b90a-ba7989750e02/download>
- Ou, H. W., Fang, M. L., Chou, M. S., Chang, H. Y., & Shiao, T. F. (2020). Long-term evaluation of activated carbon as an adsorbent for biogas desulfurization. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(6), 641–648.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1754305>
- Park, Y. G. (2021). Estudio para la recuperación de metano mediante biogás comprimido (Bio-CNG) en la codigestión anaeróbica utilizando efluentes de molinos de aceite de palma (POME) de Malasia. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 26, 435–446.
<https://doi.org/10.1007/s12257-019-0401-2>
- Parker, W., Celmer-Repin, D., Bicudo, J., & Law, P. (2020). Assessment of the use of mainstream iron addition for phosphorous control on H₂S content of biogas from anaerobic digestion of sludges. *Water Environment Research*, 92(3), 338–346. <https://doi.org/10.1002/wer.1161>
- Persson, T., Persson, K. M., & Åström, J. (2021). Ferric oxide-containing waterworks sludge reduces emissions of hydrogen sulfide in biogas plants and the need for virgin chemicals. *Sustainability*, 13(13), Artículo 7416. <https://doi.org/10.3390/su13137416>
- Petersson, A., & Wellinger, A. (2009). Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy Task 37. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf
- Poh, P. E., & Chong, M. F. (2009). Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource Technology*, 100(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.017>
- Pokorna-Krayzelova, L., Mampaey, K. E., Vanneck, T. P. W., Bartacek, J., Jenicek, P., & Volcke, E. I. P. (2017). Model-based optimization of microaeration for biogas desulfurization in UASB reactors. *Biochemical Engineering Journal*, 125, 171–179.
<https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.06.009>

- Rani, A., Negi, S., Chen, Y. N., Yu, C. H., & Pan, S. Y. (2025). Electrochemical biogas upgrading: Energy, environmental, economic, and engineering considerations. *GCB Bioenergy*, 17(8), Artículo e70063. <https://doi.org/10.1111/gcbb.70063>
- Ruan, R., Cao, J., Li, C., Zheng, D., & Luo, J. (2017). The influence of micro-oxygen addition on desulfurization performance and microbial communities during waste-activated sludge digestion in a rusty scrap iron-loaded anaerobic digester. *Energies*, 10(2), Artículo 258. <https://doi.org/10.3390/en10020258>
- Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633–1645. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>
- Sahota, S., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Chandra, R., Ghosh, P., Shah, G., Kapoor, R., Vijay, V., Koutu, V., & Thakur, I. S. (2018). Characterization of leaf waste based biochar for cost effective hydrogen sulphide removal from biogas. *Bioresource Technology*, 250, 635–641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.093>
- Sarwani, M. K. I., Fawzi, M., Osman, S. A., & Nasrin, A. B. (2019). Bio-methane from Palm Oil Mill Effluent (POME): Transportation fuel potential in Malaysia. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 63(1), 1–11. https://www.akademiabaru.com/doc/ARFMTSV63_N1_P1_11.pdf
- Severi, C. A., Pascual, C., Perez, V., Muñoz, R., & Lebrero, R. (2025). Pilot-scale biogas desulfurization through anoxic biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 485, Artículo 136830. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136830>
- Sousa, M. R., Oliveira, C. J. S., Lopes, A. C., & Fdz-Polanco, M. (2016). Technical, economical, and microbiological aspects of the microaerobic process on H₂S removal for low sulfate concentration wastewaters. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 180, 1386–1400. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2174-9>
- Speece, R. E. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. Archae Press.
- Stams, A., & Plugge, C. (2009). Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. *Nature Reviews Microbiology*, 7(8), 568–577. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2166>
- Tajarudin, H., Santiagoo, R., Gomesh, N., Daud, Z., Zaman, N., Adzami, N., & Kamarzaman, F. (2020). Identification of *Paracoccus solventivorans* sp. as sulphate oxidizing bacteria isolated from palm oil sludge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 616, Artículo 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/616/1/012006>
- Shelford, T. J., Gooch, C. A., & Lansing, S. A. (2019). Mitigating hydrogen sulfide in anaerobic digesters on dairy farms using automated iron chloride injection systems. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(3), 283–291. <https://doi.org/10.13031/aea.12939>

- Tong, S. L., & Jaafar, A. B. (2006). POME biogas capture, upgrading and utilization. *Palm Oil Engineering Bulletin*, (78), 11–17.
- Tripathi, A. K., Thakur, P., Saxena, P., Rauniyar, S., Gopalakrishnan, V., Singh, R. N., Gadhamshetty, V., Gnimpieba, E. Z., Jasthi, B. K., & Sani, R. K. (2021). Gene sets and mechanisms of sulfate-reducing bacteria biofilm formation and quorum sensing with impact on corrosion. *Frontiers in Microbiology*, 12, Artículo 754140. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.754140>
- Tsui, T. H., Zhang, L., Zhang, J., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2022). Engineering interface between bioenergy recovery and biogas desulfurization: Sustainability interplays of biochar application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, Artículo 112053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112053>
- UCL Library Guides. (2025). Systematic searching: Reviewing your search strategy. University College London. <https://library-guides.ucl.ac.uk/systematic-searching/reviewing-strategy>
- Ullah, U., Alkorbid, A. S., Jalalah, M., Harraz, F. A., Alalawy, A. I., Hassan, S. H. A., & Salama, E. S. (2025). Lab to large-scale applications of microaeration in anaerobic digestion: Biowaste digestibility, microbiome nexus, and reactor stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), Artículo 117766. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117766>
- Vikrant, K., Kailasa, S. K., Tsang, D. C. W., Lee, S. S., Kumar, P., Giri, B. S., Singh, R. S., & Kim, K. H. (2018). Biofiltration of hydrogen sulfide: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 187, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.188>
- Vikromvarasiri, N., Champreda, V., Boonyawanich, S., & Pisutpaisal, N. (2017). Hydrogen sulfide removal from biogas by biotrickling filter inoculated with *Halothiobacillus neapolitanus*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18425–18433. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.020>
- Vu, H. P., Nguyen, L. N., Wang, Q., Ngo, H. H., Liu, Q., Zhang, X., & Nghiem, L. D. (2021). Hydrogen sulphide management in anaerobic digestion: A critical review on input control, process regulation, and post-treatment. *Bioresource Technology*, 346, Artículo 126634. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126634>
- Vuppaladadiyam, A. K., Jena, M. K., Hakeem, I. G., et al. (2024). A critical review of biochar versus hydrochar and their application for H₂S removal from biogas. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 23, 699–737. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09700-8>
- Wierzbińska, M., & Juraszek, D. (2024). The comparison of biogas desulphurisation process using bog iron ore and SulfurE – A case study. *Journal of Ecological Engineering*, 25(4), 259–269. <https://doi.org/10.12911/22998993/193179>
- Wu, D., Li, L., Zhao, X., Peng, Y., Yang, P., & Peng, X. (2019). Anaerobic digestion: A review on process monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.039>
- Zhang, C., Lu, Q., & Li, Y. (2023). A review on sulfur transformation during anaerobic digestion of organic solid waste: Mechanisms, influencing factors and resource recovery. *Science of*

The Total Environment, 865, Artículo 161193.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161193>

Apéndices

Apéndice A. Requisitos de calidad de los generadores CHP400



Manual Grupo Generador CHP400 - V1.0

12. SUMINISTRO DE BIOGÁS

El generador a gas CHP400 fue proyectado para utilizar exclusivamente biogás como combustible. Para el correcto funcionamiento del generador es necesario garantizar el suministro de combustible en el flujo, calidad y presión necesaria. El biogás debe ser limpio, libre de humedad, contaminantes e impurezas.

REQUISITOS DE CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

El sistema de suministro y tratamiento del biogás para el generador debe ser dimensionado considerando las siguientes condiciones para el combustible.

REQUISITOS DE CALIDAD DEL BIOGÁS		
Flujo Máximo a la Plena Carga		146 Nm ³ /h
PCI de Referencia (60% de CH ₄ / 35% de CO ₂) ¹		23.359 kJ /m ³
Presión Manométrica de Operación	Máxima	500 mbar (g)
	Mínima	110 mbar (g)
Temperatura de Operación	Máxima	60°C
	Mínima	0°C
Contenido de Metano ² (CH ₄)	Máximo	80%
	Mínimo	55%
Contenido de Sulfuro de Hidrógeno - H ₂ S	Limite Ideal	100 ppm
	Limite Tolerable	200 ppm
Contenido de Siloxanos	Máximo	5 mg/Nm ³
Partículas	Cantidad Máxima	10 mg/Nm ³
	Tamaño Máximo	5 μ

Apéndice B. Fundamento y método de cálculo del índice buffer- CENIPALMA

6.3.4. Fundamento del método

Los índices de alcalinidad son parámetros empleados como criterios de control, que brindan información acerca de la estabilidad de los sistemas de tratamiento anaerobios, utilizados para el saneamiento de aguas residuales.

El presente método consiste en la determinación potenciométrica simultánea de diferentes tipos de alcalinidad (atribuida a bicarbonatos, a ácidos grasos volátiles (AGV) y total), implementando una solución ácida como titulante, hasta alcanzar valores de pH de 5,75 y 4,30, en la muestra. El volumen de titulante consumido con un pH de 5,75 en el medio acuoso (V_1), está asociado con la alcalinidad aportada por bicarbonatos; mientras, un pH de 4,30 (V_2) es atribuible a la alcalinidad debida a los AGV. La alcalinidad total se calcula como la suma de V_1 y V_2 .

6.3.11. Cálculos

Si todo el proceso de análisis se ejecutó bajo las mismas condiciones de operatividad analítica, cuidando la reproducibilidad de la metodología y el adecuado uso de los instrumentos de medida, calcular los índices de alcalinidad mediante las siguientes ecuaciones:

$$IB = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \quad \frac{AI}{AP} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{Alfa-}\alpha = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$

En donde:

Índice buffer (IB): relación entre la alcalinidad atribuida a los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad total.

Índice AI/AP: relación entre la alcalinidad debida a los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad bicarbonática.

Índice alfa- α : relación entre la alcalinidad bicarbonática y la alcalinidad total.

V_1 : volumen de la solución estandarizada de ácido clorhídrico 0,1 N, consumido en la titulación de la muestra hasta pH= 5,75 (mL).

V_2 : volumen de la solución estandarizada de ácido clorhídrico 0,1 N, consumido en la titulación de la muestra hasta pH= 4,30 (mL).

Apéndice C. Registro en tiempo real del analizador Awiflex



Estado		Valores actuales		Histórico	Admin	Ayuda	Contacto
4146	Valores	Ajustes	Ajustes avanzados				
				UDC	Lagoon 2	Lagoon 1	Punto d
	CH4_4 (% Vol.)			51.6(16:33)	53.2(16:38)	55.3(16:44)	0.0(16:48)
	O2_3 (% Vol.)			2.58(16:33)	2.28(16:38)	1.45(16:44)	21.07(16:48)
ERRORS	CO2_5 (% Vol.)			32.2(16:33)	31.8(16:38)	34.1(16:44)	0.2(16:48)
	H2S_1 (ppm)			44(16:34)	149(16:40)	61(16:46)	0(16:50)
	H2O (% Vol.)			17.800(16:51)			
	F ucomp (m3/h)			252(16:51)			
	F dry 0/1013 (m3/h)			215(16:51)			
	V dry 0/1013 (m3)			548976(16:...			
	P i n 25/0, 1013 (kW)			1105(16:51)			
	E i n 25/0, 1013 (kWh)			1408390(16:...			

Apéndice D. Análisis de sensibilidad realizada a los términos en Scopus



Scopus

Search Sources SciVal [?](#) [🔔](#) [🏛️](#) [IC](#)

Advanced query

```
TITLE-ABS-KEY ( ( biogas* OR biomethane OR "sour gas" ) AND ( "Anaerobic digestion" OR AD ) AND ( "hydrogen sulfide" OR H2S ) AND ( control OR abatement OR mitigation OR removal OR treatment OR clean* OR desulfurization OR technolog* OR purif* OR reduction ) )
```

Show less

[Save search](#)
[Set search alert](#)
[Edit in advanced search](#)

Beta

Documents Preprints Secondary documents

819 documents found

[Analyze results](#)


Scopus

Search Sources SciVal [?](#) [🔔](#) [🏛️](#) [IC](#)

Advanced query

```
TITLE-ABS-KEY ( ( biogas* OR biomethane OR "sour gas" ) AND ( "Anaerobic digestion" OR AD ) AND ( "hydrogen sulfide" OR H2S ) AND ( control OR abatement OR mitigation OR removal OR treatment OR clean* OR desulfurization OR technolog* OR purif* OR reduction OR "biological oxidation" ) )
```

Show less

[Save search](#)
[Set search alert](#)
[Edit in advanced search](#)

Beta

Documents Preprints Secondary documents

819 documents found

[Analyze results](#)


Scopus

Search Sources SciVal [?](#) [🔔](#) [🏛️](#) [IC](#)

Advanced query

```
TITLE-ABS-KEY ( ( biogas* OR biomethane OR "sour gas" ) AND ( "Anaerobic digestion" OR AD ) AND ( "hydrogen sulfide" OR H2S ) AND ( control OR abatement OR mitigation OR removal OR treatment OR clean* OR desulfurization OR technolog* OR purif* OR reduction OR "scrubbing" ) )
```

Show less

[Save search](#)
[Set search alert](#)
[Edit in advanced search](#)

Beta

Documents Preprints Secondary documents

819 documents found

[Analyze results](#)

Apéndice E. Formulario de Google forms aplicado a operador.

Sección 2: Comparación de Importancia (Criterios)

El primer concepto mencionado en la fila corresponde a la opción (A) y el segundo a la opción (B)

Para lograr el objetivo de seleccionar la mejor tecnología complementaria, compare los siguientes pares de criterios:

Desempeño técnico vs Viabilidad económica

- (9) A extremadamente más importante que B
- (8) A muy fuertemente más importante que B (intermedio)
- (7) A muy fuertemente más importante que B
- (6) A fuertemente más importante que B (intermedio)
- (5) A fuertemente más importante que B
- (4) A moderadamente más importante que B (intermedio)
- (3) A moderadamente más importante que B
- (2) A ligeramente más importante que B
- (1) Igual importancia
- (1/2) B ligeramente más importante que A
- (1/3) B moderadamente más importante que A
- (1/4) B moderadamente más importante que A (intermedio)
- (1/5) B fuertemente más importante que A
- (1/6) B fuertemente más importante que A (intermedio)
- (1/7) B muy fuertemente más importante que A
- (1/8) B muy fuertemente más importante que A (intermedio)
- (1/9) B extremadamente más importante que A

Comparación de subcriterios

Dentro de cada criterio, compare los subcriterios según su importancia para lograr el objetivo.

Dentro de Desempeño técnico: Eficiencia vs Capacidad de carga
A = Eficiencia, B = Capacidad de carga

- (9) A extremadamente más importante que B
- (8) A muy fuertemente más importante que B (intermedio)
- (7) A muy fuertemente más importante que B
- (6) A fuertemente más importante que B (intermedio)
- (5) A fuertemente más importante que B
- (4) A moderadamente más importante que B (intermedio)
- (3) A moderadamente más importante que B
- (2) A ligeramente más importante que B
- (1) Igual importancia
- (1/2) B ligeramente más importante que A
- (1/3) B moderadamente más importante que A
- (1/4) B moderadamente más importante que A (intermedio)
- (1/5) B fuertemente más importante que A
- (1/6) B fuertemente más importante que A (intermedio)
- (1/7) B muy fuertemente más importante que A
- (1/8) B muy fuertemente más importante que A (intermedio)
- (1/9) B extremadamente más importante que A

Apéndice F. Matriz de comparaciones pareadas con los juicios emitidos**Tabla 7.***Matriz de comparaciones pareadas*

	Desempeño técnico	Viabilidad económica	Complejidad operativa
Desempeño técnico	1	7	6
Viabilidad económica	1/7	1	2
Complejidad operativa	1/6	1/2	1

Apéndice G. Procedimiento matemático AHP (pesos y razón de consistencia)

A continuación, se detalla un poco más el procedimiento matemático en el desarrollo del objetivo 3, así como el cálculo de la razón de consistencia.

Construcción de la Matriz de Juicios (A): Se tabularon las comparaciones pareadas obtenidas del panel de expertos. La matriz se organiza colocando los criterios tanto en filas como en columnas, donde cada valor a_{ij} representa la importancia relativa del criterio de la fila sobre el de la columna.

$$\begin{matrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & a_{24} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & a_{34} \\ 1/a_{14} & 1/a_{24} & 1/a_{34} & 1 \end{matrix} \quad (\text{Ec. 3})$$

Normalización de la Matriz (A): Se calcula dividiendo cada elemento de la columna anterior por la suma de su respectiva columna:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Cálculo del Vector de Prioridad o Pesos (w): Se obtiene calculando el promedio aritmético de cada fila de la matriz normalizada. Este vector indica la importancia relativa de cada criterio:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a'_{ij}}{n} \quad (\text{Ec. 5})$$

A partir de aquí empieza el procedimiento que permite el cálculo de la razón de consistencia.

Estimación del Autovalor Máximo (λ_{\max}): Se calcula el vector de consistencia dividiendo el producto de la matriz original por el vector de pesos (w) entre el peso correspondiente de cada criterio. El promedio de estos valores es el λ_{\max} .

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A * w)_i}{w_i} \quad (\text{Ec. 6})$$

Cálculo de los Índices de Consistencia (IC y RC): Para validar que las comparaciones no fueron aleatorias y poseen coherencia lógica, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

Índice de consistencia:
$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ec. 7})$$

Razón de consistencia:
$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde n=3 y el índice de aleatoriedad es de 0.58, tal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 8.

Índice de aleatoriedad (IA)

n	3	4	5	6	7	8
IA	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41