

Capacidad de generación de energía eléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá, Ayacucho

Ability for generating electricity at the La Totorá wastewater treatment plant, Ayacucho

Recibido: 08 de abril de 2026 | Revisado: 12 de mayo de 2026 | Aceptado: 26 de mayo de 2026

Aníbal Pablo García Bendezú¹

1 Escuela Universitaria de Posgrado – Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú

Correo: anibal.garcia@unsch.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-5355-0255>

<https://doi.org/10.62428/rcvp2026512150>

Abstract

The aim was to determine the potential for generating electricity from biogas produced at the La Totorá wastewater treatment plant in Ayacucho, 2024–2026. The study focused on urban wastewater generated in the city of Huamanga; to determine this potential, four quantification methods were used: the amount of volatile solids, Chemical Oxygen Demand (COD), the population served, and Biochemical Oxygen Demand (BOD₅). These values were averaged to determine the potential for electricity generation, and the amount of greenhouse gases (GHGs) that could be avoided was also quantified. The result was that the average biogas produced by the plant was 3,554.42 m³/day; the electricity generation potential of the biogas produced by the plant was 23,034.42 kWh/day, and the total reduction in greenhouse gases at the plant was 20,778.23 tCO₂eq/year (92.73%). A procedure was developed to determine the potential for electricity generation from the biogas produced at the La Totorá wastewater treatment plant, as well as the resulting reduction in greenhouse gas emissions. It is recommended that, for wastewater treatment facilities to be implemented in Huamanga and other locations in the country, the use of biogas should be an initial consideration, with the aim of diversifying the energy mix.

Keywords: Energy potential, biogas, COD, BOD₅, volatile solids, greenhouse gases.

Resumen

El objetivo fue determinar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás producido en la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá en Ayacucho, 2024 - 2026. El estudio se centró en las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad de Huamanga; para determinar dicho potencial, se utilizaron cuatro métodos de cuantificación: la cantidad de sólidos volátiles, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la población beneficiada y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), se promediaron estos valores para determinar el potencial de generación de energía eléctrica y también se cuantificó la cantidad de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) que se podrían evitar. El resultado fue que el promedio de biogás producido por la planta fue de 3,554.42 m³/día; el potencial de generación de energía eléctrica del biogás producido por la planta fue de 23,034.42 kWh/día y la reducción total de gases de efecto invernadero en la planta fue de 20,778.23 tCO₂eq/año (92,73%). Se consiguió desarrollar un procedimiento, con la finalidad de determinar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás producido en la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá y a su vez la reducción de gases de efecto invernadero. Se recomienda que, la utilización del biogás debe ser una consideración inicial, con la intención de diversificar la matriz energética para los establecimientos de tratamiento de aguas residuales que se implementen en Huamanga y en otras localidades del país.

Palabras clave: Potencial energético, biogás, DQO, DBO₅, sólidos volátiles, gases de efecto invernadero.



Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Introducción

A nivel mundial, el interés por las fuentes de energía renovables se ha intensificado, impulsado por la crisis climática y la necesidad de garantizar la seguridad energética. En este contexto, la valorización energética de residuos emerge como una estrategia clave para la transición hacia una economía circular. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) representan un escenario idóneo, ya que el proceso de depuración genera lodos con un alto contenido de materia orgánica, susceptibles de ser tratados mediante digestión anaerobia para producir biogás (Chen et al., 2024). Este biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), pueden ser aprovechados para generar energía eléctrica y térmica, transformando un subproducto del tratamiento en un recurso energético renovable (Hoo et al., 2022).

Existe una amplia gama de investigaciones sobre la digestión anaerobia y la generación de biogás en PTARs. Estudios previos se han enfocado en optimizar los parámetros operativos (como tiempo de retención hidráulica, temperatura y relación carbono/nitrógeno) para maximizar la producción de metano (Li et al., 2023). La producción de bioenergía en forma de calor y electricidad es una de las mejores opciones para reducir la escasez de energía con la cantidad mínima de impactos ecológicos (Yasar et al. 2017).

Sin embargo, la aplicación y el análisis detallado de estas tecnologías suelen estar más documentados en PTARs de gran escala o en regiones con mayor desarrollo tecnológico, dejando un vacío de información para plantas de mediana capacidad en países en desarrollo, donde factores locales como la altitud, el clima y la composición de las aguas residuales pueden influir significativamente en el proceso (Mendoza et al., 2023).

A pesar de su potencial, muchas PTARs, especialmente en regiones como Latinoamérica, operan el proceso de digestión anaerobia sin un sistema para la captura y aprovechamiento energético del biogás generado. Esto conlleva a la emisión directa de metano a la atmósfera, un gas con un potencial de calentamiento global entre 28 a 34 veces superior al del CO_2 en un horizonte de 100 años (Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC, 2021), desaprovechando al mismo tiempo una fuente de energía autóctona que podría reducir la dependencia de combustibles fósiles y los costos operativos de la planta.

Â Ramírez, Medrano y Escobedo (2020), consideraron que, el biogás es una fuente de energía importante y abundante en las plantas de tratamiento de aguas residuales, cuyo principal residuo son los lodos que producen biogás, el cual actualmente no es aprovechado, por lo que, estimaron el potencial de generación de energía eléctrica a partir del biogás generado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Zona Noreste mediante cuatro métodos para cuantificación de producción de biogás, siendo una de las más grandes de Tabasco.

El Banco Interamericano de Desarrollo, presenta una nota técnica que tiene el objetivo de difundir los conocimientos que existen en el ámbito del tratamiento de aguas residuales con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la posibilidad de reducir dichas emisiones para generar bonos de carbono y el potencial de generación de energía que presentan algunos sistemas de tratamiento, detallando la metodología para proyectos MDL y describiendo los pasos a seguir, junto con las fórmulas utilizadas para el cálculo de reducciones de emisiones (Nolasco, 2010).

Por otro lado, Aguirre (2022), evaluó el potencial de energía eléctrica que se puede generar mediante los procesos de digestión anaerobia realizados en los tratamientos de aguas residuales domésticas (ARD) del departamento del Tolima, con el fin de identificar reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y ahorros monetarios. La creciente demanda de energía de la sociedad moderna y la alta dependencia de las fuentes de energía no renovables, así como los problemas ambientales asociados, hace necesario que se busquen nuevas opciones de fuentes energéticas, por lo cual Cordero (2017) analizó el aprovechamiento energético de las aguas residuales urbanas en ciudades de altura

La PTAR La Totorá en Ayacucho, Perú, es un caso representativo de esta situación, donde la falta de caracterización del potencial específico del biogás y de un diseño de sistema de aprovechamiento adaptado al contexto

local impide materializar estos beneficios. Esta investigación es de vital importancia por su triple contribución a la sostenibilidad: ambiental, energética y operativa:

- Desde el punto de vista ambiental, propone una solución para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la captura y uso del metano.
- Energéticamente, promueve la generación distribuida de electricidad renovable, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética regional.
- Operativamente, puede mejorar la gestión de los lodos y reducir los costos de energía de la planta, aumentando su eficiencia y sostenibilidad financiera.

Estudiar este potencial en La Totora sirve como un modelo replicable para otras PTARs con características similares en la región andina.

Este trabajo se alinea y se fundamenta en investigaciones previas sobre la optimización de la digestión anaerobia y la evaluación del potencial de biogás. Se vincula directamente con estudios que analizan la composición del biogás y su poder calorífico para el dimensionamiento de moto generadores (Hoo et al., 2022), y con aquellos que promueven la producción de biocombustibles por su naturaleza renovable, la mitigación del cambio climático y la seguridad energética proporcionada por un suministro variable (Yasar et al. 2017). Además, dialoga con investigaciones que enfatizan la necesidad de adaptar las tecnologías de aprovechamiento a las condiciones locales y a la escala de las plantas (Mendoza et al., 2023). Este estudio aplica estos marcos conceptuales y metodológicos al caso específico de La Totora, generando datos empíricos locales y proponiendo un sistema contextualizado.

Con base en lo anterior, este artículo tiene como objetivo general determinar el potencial de generación de electricidad a partir del biogás producido en la PTAR La Totora de Ayacucho, con el fin de proponer un sistema sostenible que aproveche este recurso renovable. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la cantidad y composición del biogás generado a partir de los lodos tratados en la planta, identificando los factores operativos que afectan su producción.
- Establecer el potencial del biogás para la producción de energía eléctrica.
- Examinar la contribución potencial de la implementación de dicho sistema a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs), evaluando las ventajas ambientales por la sustitución de energía de origen fósil.

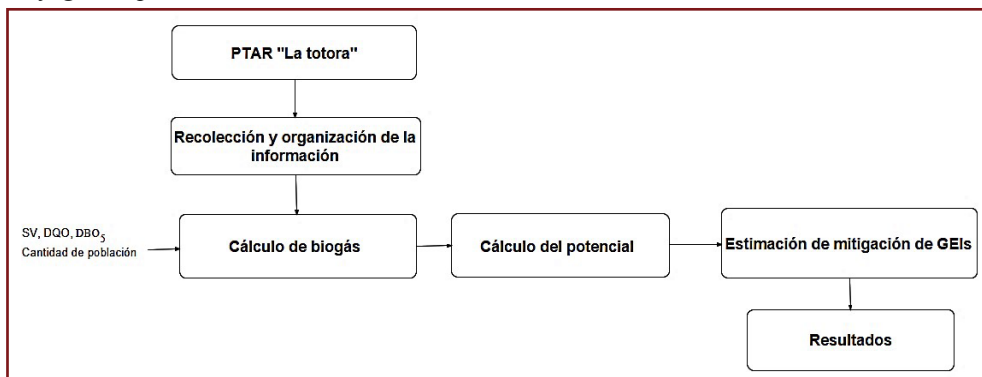
Materiales y métodos

Para abordar el objetivo de determinar el potencial de generación eléctrica a partir del biogás, se adoptó un enfoque metodológico que integra componentes experimentales y analíticos.

El problema se abordó en tres fases interconectadas (Figura 1):

1. Caracterización y cuantificación del sustrato: Se determinó el potencial generador de biogás de los afluentes y lodos de la PTAR, utilizando como indicadores clave la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) y los Sólidos Volátiles (SV). Esto permitió estimar la carga orgánica disponible para la digestión anaerobia.
2. Estimación de la producción de biogás y metano: Se aplicaron cuatro métodos de cuantificación independientes y ampliamente validados en la literatura (basados en DQO, DBO₅, SV y población equivalente). Los resultados de cada método se promediaron para obtener una estimación robusta y consensuada del volumen y la composición esperada del biogás, con especial énfasis en el contenido de metano (CH₄).
3. Evaluación del potencial energético y ambiental: A partir de la producción estimada de metano, se calculó el potencial de generación de electricidad. Finalmente, se evaluó la contribución potencial del sistema a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs).

Figura 1
Flujograma procedimental



La población de estudio fue los afluentes y lodos generados en el proceso de tratamiento de la PTAR La Totora, que constituyen el sustrato para la producción de biogás, durante los meses de enero a octubre del año 2024. El biogás producido de manera potencial a partir de la digestión anaerobia completa de la población definida.

Figura 2
Planta de tratamiento de aguas residuales La Totora



Nota. SEDA AYACUCHO S.A. © ANDINA / Editora Perú.

Las muestras se tomaron diariamente en el afluente de la PTAR La Totora durante los meses de enero a octubre del año 2024 y las de lodo cada 3 meses. La caracterización de estas muestras se realizó a través de mediciones y análisis diarios del sustrato, durante los meses que duró el estudio.

Procedimiento experimental y de cálculo

El procedimiento para la estimación del potencial de biogás y energía se estructuró en las siguientes etapas:

a) Recolección de datos primarios y secundarios:

- Se obtuvieron datos operativos históricos y en tiempo real de la PTAR (caudal de entrada, características del agua residual, producción de lodos), mediante diarios de campo.
- Se realizaron mediciones in situ de parámetros clave (temperatura, pH), y se tomaron muestras sistemáticas compuestas de agua residual y lodos para análisis en el laboratorio de DBO, DQO₅ y sólidos volátiles.

b) Análisis de laboratorio:

- Las muestras se analizaron para determinar DQO, DBO₅ y sólidos totales volátiles (STV) según los métodos estándar (APHA, 2017).

- La composición esperada del biogás (porcentajes de CH₄ y CO₂) se estimó a partir de relaciones empíricas documentadas para lodos de PTAR similares.

c) Cuantificación del potencial de biogás (Método de los Cuatro Índices):

El potencial de generación de metano, se estimó de forma independiente mediante cuatro métodos, utilizando factores de conversión específicos de la literatura (Angelidaki et al., 2019; Tchobanoglous et al., 2014):

- **Método basado en DQO removida:**

$$\text{Volumen de biogás producido} = (\text{DQO sedimentado}) * 0.35 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$$

- **Método basado en DBO₅ removida:**

$$\text{Volumen de biogás producido} = Q \cdot \frac{(DBO_{5 \text{ entrada}} - DBO_{5 \text{ salida}}) \cdot \text{Factor } CH_4}{DBO_5} \cdot \% E.D.$$

Se empleó para este cálculo el software BIO Watt (Herramienta de evaluación tecnológica de aguas residuales para biogás).

- **Método basado en Sólidos Volátiles (SV):**

$$\text{Volumen de biogás producido} = (\text{SV sedimentados}) * 0.8 \text{ m}^3/\text{kg SV}$$

- **Método basado en Población Equivalente (PE):**

$$\text{Volumen de CH}_4 \text{ producido/día} = \text{personas beneficiadas} * 0.016 \text{ m}^3/\text{persona} \times \text{día}$$

d) Cálculo de generación de energía eléctrica potencial y beneficio ambiental:

- La **generación de energía eléctrica potencial (kWh/día)** se calculó con la fórmula:

$$\text{Generación de energía eléctrica a partir del biogás producido} = (\text{promedio de biogás obtenido}) * (0.65) * (9.97 \text{ kWh/m}^3)$$

- La **reducción de emisiones de CO₂e (tCO₂eq/año)** se estimó considerando la metodología MDL (Mecanismo de desarrollo limpio), ER = BE – PE, para lo cual se precisa calcular los valores de:

$$(1) BE = (Q) (COD_d) (MCF_s) (B_0) (GWP_{CH_4}) (UF)$$

$$(2) PE = (Q) (COD_d) (B_0) (GWP_{CH_4}) (L)$$

donde, ER: reducción de emisiones; BE: emisiones de base; PE: emisiones del proyecto.

Instrumentos y equipos

- **Medición y análisis:** Medidor de flujo de caudal, sondas multiparamétricas (pH, temperatura), turbidímetro, equipos para análisis de DQO (digestor, titulador), equipos para DBO₅ (botellas, incubadora), mufla y balanza para análisis de sólidos.
- **Software de análisis:** Se utilizó el software BioWATT, Python 3 y Microsoft Excel para el procesamiento estadístico de datos, el cálculo de promedios y desviaciones estándar de los cuatro métodos, y la modelización de los resultados energéticos y ambientales.
- **Datos secundarios:** Se consultaron informes técnicos de la PTAR, publicaciones científicas para la selección de factores de conversión y estándares internacionales (IPCC, APHA).

Resultados

El volumen de biogás que se genera en la planta de tratamiento La Totorá, ha sido calculado por 4 métodos de cuantificación, cuyos resultados se presentan a continuación:

1) Método basado en la cantidad de sólidos volátiles en los efluentes

Biogás producido:

$$\text{Volumen de biogás producido} = 2,661.92 \text{ kg SV/día} \times 0.8 \text{ m}^3/\text{kg SV}$$

$$\text{Volumen de biogás producido} = 2,129.54 \text{ m}^3/\text{día}$$

2) Método basado en la DQO

Biogás producido:

$$\text{Volumen de biogás producido} = 12,313.52 \text{ kg DQO/día} \times 0.35 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$$

$$\text{Volumen de biogás producido} = 4,309.73 \text{ m}^3/\text{día}$$

3) Método basado en la población beneficiada

Biogás producido:

$$\text{Volumen de CH}_4 \text{ producido por día} = 252,258 \text{ personas} \times 0.016 \text{ m}^3/\text{persona}$$

$$\text{Volumen de CH}_4 \text{ producido por día} = 4,036.19 \text{ m}^3/\text{día}$$

4) Método basado en la DBO

El software BioWATT (Biogas Wastewater Assessment Technology Tool), que es una herramienta de evaluación tecnológica de la producción de biogás en función a la DBO_5 , da como resultado que la cantidad de biogás producido en las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá de la ciudad de Huamanga es de $3,742.22 \text{ m}^3/\text{día}$.

En función a estos resultados se saca un promedio del biogás producido en la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá, cuyo valor se presenta a continuación:

Promedio de biogás producido/día = (volumen por SV + volumen por DQO

$$+ \text{volumen per cápita} + \text{volumen por DBO}_5) \div 4$$

Promedio de biogás producido = $3,554.42 \text{ m}^3/\text{día}$.

Tabla 1

Promedio de volumen de biogás producido

Método	Volumen (m ³ /día)
Cantidad de sólidos volátiles en los afluentes	2 129,54
Cantidad de demanda química de Oxígeno (DQO)	4 309,73
Población beneficiada	4 036,19
Cantidad de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	3 742,22
Promedio	3 554,42

Durante el período de estudio, el biogás reveló una composición promedio estable, con un contenido de metano (CH_4) de 60% en volumen y de dióxido de carbono (CO_2) de 35% en volumen. El 5% restante correspondió

a gases traza, entre los que se identificaron principalmente nitrógeno (N₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y vapor de agua (H₂O).

Tabla 2

Composición promedio del biogás de la PTAR La Totorá

Componente	Concentración (% en volumen)
Metano (CH ₄)	60,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	35,0
Nitrógeno (N ₂)	3,2
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0,2
Vapor de agua (H ₂ O)	1,6

Nota. La relación CH₄/CO₂ de 1.71 indica un proceso de digestión anaerobia eficiente, dentro de los rangos típicos reportados para biogás proveniente de lodos residuales municipales (40-70% CH₄; 30-50% CO₂) (Angelidaki et al., 2018).

Posteriormente se procedió a calcular la generación de energía eléctrica a partir del promedio del biogás producido.

Generación de energía eléctrica a partir del biogás producido = 3,554.42 m³/día x 0,65 x 9,97 kWh/m³

Generación de energía eléctrica a partir del biogás producido = 23,034.42 kWh/día

Para la determinación de emisiones de gases de efecto invernadero, es sumamente importante conocer cuál es el impacto ambiental al implementar un proyecto de este tipo. Para calcular la cantidad de gases de efecto invernadero evitados al implementar una planta de tratamiento de aguas residuales que tenga un sistema de captación de biogás se utilizará la metodología dada en la Nota Técnica N° 116 del Banco Interamericano de Desarrollo de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio en plantas de tratamiento de aguas residuales (Nolasco, 2010). Con el empleo de esta metodología, se aplica la siguiente fórmula:

$$ER = BE - PE$$

Donde ER es la reducción de emisiones, BE son las emisiones de base, que actualmente genera la planta de tratamiento de aguas residuales La Totorá y PE son las emisiones con la implementación de este trabajo.

$$BE = (Q) (COD_d) (MCF_s) (B_0) (GWP_{CH_4}) (UF)$$

$$BE = (13,248,273.6 \text{ m}^3/\text{año}) (0,00051 \text{ t/m}^3) (0.8) (0.21) (21) (0.94)$$

$$BE = 22,407.11 \text{ tCO}_2\text{eq/año}$$

$$PE = (Q) (COD_d) (B_0) (GWP_{CH_4}) (L)$$

$$PE = (13,248,273.6 \text{ m}^3/\text{año}) (0.00015\text{t/m}^3) (0.21) (21) (0.2)$$

$$PE = 1,752.75 \text{ tCO}_2\text{eq/año}$$

Por último, se calcula la reducción de emisiones (ER) como la diferencia entre las emisiones de base y las del presente trabajo:

$$ER = BE - PE$$

$$ER = 22,407.11 \text{ tCO}_2\text{eq/año} - 1,752.75 \text{ tCO}_2\text{eq/año}$$

$$ER = 20,654.36 \text{ tCO}_2\text{eq/año}$$

Por otra parte, al utilizar la herramienta BioWATT para el cálculo de las emisiones evitadas con la implementación del presente trabajo de tesis, dio como resultado 1,505 tCO₂eq/año.

Con estos datos, se procede a calcular el promedio de las emisiones evitadas.

$$\text{Promedio de emisiones evitadas} = 1,752.75 \text{ tCO}_2\text{eq/año} + 1,505 \text{ tCO}_2\text{eq/año} / 2 = 1,628.88 \text{ tCO}_2\text{eq/año}$$

Reducción de emisiones = 22,407.11 tCO₂eq/año - 1,628.88 tCO₂eq/año = 20,778.23 tCO₂eq/año

Cálculo del % de reducción de emisiones = $\frac{20\,778,23}{22\,407,11} \times 100 = 92,73 \%$

Con base al cálculo anterior, es importante evidenciar la incidencia positiva que podría tener la captura y transformación del biogás generado en la PTAR La Totora en energía eléctrica, dado que existe una posibilidad importante para la mitigación de gases de efecto invernadero.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran de manera cuantitativa el potencial significativo de la PTAR La Totora para convertirse en un centro de generación de energía renovable y mitigación climática. El volumen promedio de biogás estimado (3,554.42 m³/día) confirma que la carga orgánica de los afluentes representa un recurso energético subutilizado de magnitud considerable. La variabilidad observada entre los cuatro métodos de cuantificación (de 2,129.54 a 4,309.73 m³/día) es esperable y está documentada en la literatura, reflejando un análisis energético y económico de la producción de biogás a partir de un reactor anaeróbico y lodos activados de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Cañote et al. 2020). El método basado en sólidos volátiles arrojó el valor más conservador, lo que podría asociarse a una subestimación de la fracción fácilmente biodegradable no capturada en este parámetro. Por el contrario, los métodos basados en DQO y población se alinean con estimaciones reportadas para plantas de capacidad similar en regiones con características de residuos comparables (Cheng et al., 2021).

La producción eléctrica potencial de 23,034.42 kWh/día es un hallazgo de gran relevancia práctica. Esta energía no solo podría cubrir una fracción sustancial del consumo operativo de la planta, avanzando hacia su autosuficiencia energética, sino que también podría inyectar excedentes a la red, generando un posible flujo de ingresos. Este hallazgo se alinea con la premisa de la economía circular, transformando un pasivo ambiental en un activo energético, tal como proponen Ruffi et al. (2022) para lo cual, se necesita un cambio de paradigma en las plantas (PTAR) para pasar de la eliminación tradicional a la recuperación de recursos con la finalidad de optimizar la sostenibilidad de las infraestructuras de saneamiento.

El resultado más contundente desde la perspectiva ambiental es la reducción potencial del 92.73% en las emisiones de GEI, equivalente a 20,778.23 tCO₂eq/año. Esta reducción surge de dos mecanismos sinérgicos: 1) la mitigación directa por la captura y combustión controlada del metano, evitando su liberación a la atmósfera, y 2) la mitigación por sustitución, al desplazar energía de la red que, en el contexto peruano, tiene aún una participación significativa de fuentes fósiles. La magnitud de esta reducción es coherente con estudios que aplican procedimientos tales como el de metodología de desarrollo limpio (MDL) y herramientas específicas como BioWATT, las cuales validan que el aprovechamiento energético del biogás es una de las medidas de mitigación más costo-efectivas en el sector de aguas residuales. Sin embargo, estas tecnologías se ven limitadas principalmente por restricciones políticas y económicas y la falta de subsidios. (Díaz-Trujillo, et al. 2019).

Estos hallazgos trascienden el caso de estudio específico, para la región de Ayacucho, la implementación de este sistema representaría un modelo pionero de gestión sostenible de residuos y generación descentralizada de energía, contribuyendo directamente a los objetivos de desarrollo sostenible locales y nacionales (ODS 7: Energía asequible y no contaminante, y ODS 13: Acción por el clima). Científicamente, este estudio aporta datos empíricos específicos para una planta en altitud, un factor escasamente documentado en la literatura. Las condiciones de baja presión atmosférica podrían influir en la cinética de la digestión anaerobia y en la eficiencia de los equipos de combustión, un aspecto que merece investigación más profunda.

A pesar de los resultados prometedores, es crucial reconocer las limitaciones de este estudio:

- Naturaleza estimativa: Los resultados se basan en modelos teóricos y datos de diseño o mediciones puntuales. La validación con datos operativos continuos de un digestor anaerobio a escala real en la planta es el paso siguiente indispensable para confirmar estos potenciales.
- Análisis técnico-económico preliminar: Este estudio cuantifica el potencial, pero un análisis de viabilidad integral requiere un estudio de ingeniería de detalle que incluya el dimensionamiento de equipos (digestor,

sistema de purificación, motogenerador), un análisis de costo-beneficio (ACB) completo que considere la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento, y los ingresos por venta de energía/CREDD, y un análisis de riesgos.

- Variables sociales e institucionales: La viabilidad última del proyecto depende de factores no técnicos, como la capacidad de gestión de la entidad operadora, la existencia de marcos regulatorios y tarifarios que incentiven la generación distribuida con biogás, y la aceptación comunitaria.

Estas limitaciones delimitan claros vacíos para investigaciones futuras:

- Investigación aplicada: Implementación de un proyecto piloto de digestión y cogeneración a escala reducida en la PTAR para obtener datos reales de producción y eficiencia.
- Investigación en ingeniería: Evaluación de la eficiencia de tecnologías de purificación de biogás (upgrading) adecuadas a la escala y al contexto económico local, para evaluar la factibilidad de inyectar biometano a la red.
- Investigación en políticas públicas: Análisis de los mecanismos financieros y regulatorios necesarios para catalizar la inversión en este tipo de proyectos en Perú, incluyendo estudios de modelos de negocio óptimos (ESCOs, asociaciones público-privadas).

En síntesis, los resultados presentados no solo confirman el potencial técnico-ambiental sustancial del biogás en la PTAR "La Totora", sino que también sirven como una base cuantitativa sólida para la toma de decisiones. El estudio evidencia que la transición de una PTAR como consumidora neta de energía a una productora neta es técnicamente posible y ambientalmente imperativa. Superar las limitaciones identificadas mediante investigación aplicada y el desarrollo de políticas de apoyo será clave para materializar este potencial, transformando a "La Totora" en un referente de sostenibilidad para la región andina.

Conclusiones

El estudio evaluó el potencial de generación eléctrica a partir del biogás producido en la PTAR La Totora de Ayacucho, utilizando parámetros fisicoquímicos y la carga poblacional atendida. Los resultados estimaron una producción de 1,297,363.3 m³/año de biogás y un potencial energético de 8,407,563.3 kWh/año, evidenciando la viabilidad técnica de su aprovechamiento como fuente renovable de energía. Asimismo, la valorización del biogás permitiría evitar la emisión de aproximadamente 1,628.88 toneladas de CO₂ equivalente por año, contribuyendo a la mitigación de gases de efecto invernadero y a la sostenibilidad energética regional. Los hallazgos demuestran que la implementación de sistemas de cogeneración constituye una alternativa ambientalmente sostenible y replicable en plantas de tratamiento con características similares, recomendándose estudios de prefactibilidad económica y diseño ingenieril para su aplicación a escala real.

El estudio determinó la producción de biogás en la PTAR La Totora de Ayacucho a partir de residuos orgánicos sometidos a digestión anaerobia, estimándose una generación de 3,554.42 m³/día. Los resultados identificaron que la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y los sólidos volátiles (SV) son los principales factores que influyen en la producción de biogás, mostrando una relación directamente proporcional con el volumen generado. Asimismo, variables operativas como la temperatura, el tiempo de retención hidráulica y el pH afectaron significativamente la eficiencia y estabilidad del proceso anaerobio. Los hallazgos confirman la viabilidad técnica del aprovechamiento energético del biogás y su potencial para contribuir a la sostenibilidad energética y a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el estudio aporta bases científicas para el monitoreo, optimización operativa e implementación de tecnologías de valorización energética en plantas de tratamiento similares.

El estudio evaluó la viabilidad técnica del aprovechamiento del biogás generado en la PTAR La Totora de Ayacucho para la generación de energía eléctrica aplicada al tratamiento de aguas residuales. La caracterización del biogás evidenció un contenido de CH₄ de 60%, CO₂ de 35% y trazas de H₂S y N₂, además de vapor de agua, determinándose un poder calorífico de 21,5 MJ/m³, adecuado para sistemas de generación eléctrica de media escala. El potencial energético estimado de 8 407 563,3 kWh/año permitiría cubrir el 100% de la demanda eléctrica de la planta. Asimismo, se identificó la necesidad de procesos de purificación para optimizar el rendimiento y reducir

riesgos de corrosión y emisiones contaminantes. Los resultados confirman que el biogás constituye una alternativa energética renovable, sostenible y replicable para fortalecer la eficiencia energética y la economía circular en plantas de tratamiento similares.

El estudio demostró que la generación eléctrica a partir del biogás producido en la PTAR La Titora constituye una alternativa ambientalmente eficiente para reducir emisiones de gases de efecto invernadero frente a fuentes fósiles convencionales. El aprovechamiento del metano (CH₄) evitó su liberación directa a la atmósfera y permitió sustituir parcialmente el consumo de combustibles fósiles. Los resultados estimaron una mitigación de 1,628.88 toneladas de CO₂ equivalente por año mediante la generación eléctrica in situ. El uso energético del biogás favorece además la valorización de residuos orgánicos bajo un enfoque de economía circular y sostenibilidad energética. Por lo tanto, esta tecnología representa una estrategia viable para reducir la huella de carbono, mejorar la calidad del aire y promover una matriz energética más limpia y descentralizada en plantas de tratamiento de aguas residuales similares.

Recomendaciones

- Se debe inferir que, para los establecimientos de tratamiento de aguas residuales que se implementen en Huamanga y en otras localidades del país, la utilización del biogás debe ser una consideración inicial. Asimismo, es importante reconocer que en otras áreas del país donde las temperaturas ambientales son más altas que las evaluadas en este estudio, el proceso podría funcionar con una mayor eficacia y se podría utilizar el calor generado para incorporarlo en otros procesos industriales.
- Existen diferentes tipos de energía alternativa que aún no han sido explotadas en detalle en nuestro entorno y que podrían ayudar, al igual que el recurso revisado en este estudio, a diversificar la matriz energética. Entre estas opciones se encuentran la utilización de los residuos de la madera provenientes de la tala y el recorte de plantas ornamentales en áreas urbanas, los desechos del sector agrícola y los restos ganaderos, como el estiércol. Estos materiales deben ser contabilizados y analizados.
- Debido a los beneficios que ofrecen las fuentes de energía no tradicionales, tanto desde una perspectiva ambiental como social, es fundamental crear un sistema de compensación adicional al de la comercialización de la energía producida a precios de fuentes convencionales. Estos estímulos pueden presentarse de tres maneras: 1) En el costo de la energía producida con esta fuente, 2) Disminuyendo los gastos de inversión (a través de subsidios, exenciones fiscales, etc.) y 3) Financiamiento por parte del sector público.

Referencias

- Â Ramírez, T., Medrano, O., & Escobedo, L. (2020). Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): El caso de la PTAR zona noreste, Villahermosa, México. *ENERLAC, Revista De energía De Latinoamérica Y El Caribe*, 4(1), 12–30. <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/128>
- Aguirre, S. (2022). *Evaluación del potencial de energía eléctrica que se puede generar a partir de aguas residuales domésticas (ARD) en el departamento del Tolima* [Tesis de Titulación, Universidad de Ibagué]. Repositorio Institucional Unibagué. <https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/23a568f1-1347-41e7-9070-246cb9066090/content>
- Angelidaki, I., Kougias, P. G., Lemmer, A., Luo, G., Muñoz, R., Oechsner, H., Xie, L., & Zhang, Y. (2019). Biogas upgrading: Current and emerging technologies. En S. C. Ricke (Ed.), *Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels* (2.^a ed., pp. 817–843). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6>
- Cañote, S., Mambeli, R., Silva, E., Almazan, O., Silva, I., Velásquez, J., et al. (2021). Energy and Economic Evaluation of the Production of Biogas from Anaerobic and Aerobic Sludge in Brazil. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 947-969. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01046-w>
- Cordero, J. (2017). *Evaluación del potencial energético de las aguas residuales urbanas generadas en ciudades de altura* [Tesis de magister. Universidad de Cuenca]. DSpace Ucuena. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/af942e9b-6700-4feb-8c80-bb29665c0d94/content>
- Chen, B., Appels, L., Dewil, R., & Azman, S. (2024). *Alkaline in-situ treatment: influence on the microbial*

activity and biomethane yield of anaerobic digestion. Ku Leuven. https://kuleuven.limo.libis.be/discovery/fulldisplay?docid=lirias4160036&context=SearchWebhook&vid=32KUL_KUL:Lirias&search_scope=lirias_profile&adaptor=SearchWebhook&tab=LIRIAS&query=any,contains,LIRIAS4160036&offset=0

- Cheng, H., Li, Y., & Li, W. (2021). Estimation of biogas production and the emission reduction potential from municipal wastewater treatment plants in China. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116017>
- Díaz-Trujillo, L., Tovar, J., Nápoles, F., Ponce, J., (2019). Effective Use of Carbon Pricing on Climate Change Mitigation Projects: Analysis of the Biogas Supply Chain to Substitute Liquefied-Petroleum Gas in Mexico. *Processes*, 7(10), 668; <https://doi.org/10.3390/pr7100668>
- Hoo, P. Y., et al. (2022). A review on the conversion of biogas to electricity and thermal energy: Engine and fuel cell-based systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112383. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8776554/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Li, Y., Zhao, J., Krooneman, J., Willem, G. (2021). Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: Laboratory achievements and their full-scale application potential. *Science of The Total Environment*, 755(Part 1), 142940. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142940>
- Mendoza, L., et al. (2023). Challenges and opportunities for biogas implementation in small and medium wastewater treatment plants in Latin America. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103685. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S3050475925007183>
- Nolasco, D. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales.* Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. <https://doi.org/10.18235/0009926>
- Rufi, M., Petit, A., Leipold, S., Villalba, G. et al. (2022). Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades. *Science of The Total Environment*, 838, 156422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156422>
- Tchobanoglous, G., et al. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (3era edición). McGraw-Hill.
- Yasar, A., Rasheed, R., Tabinda, A., Tahir, A., Sarwar, F. (2017). Life cycle assessment of a medium commercial scale biogas plant and nutritional assessment of effluent slurry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.026>