



Aprovechamiento de la cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos para la producción de biogás como alternativa sostenible en las comunidades peruanas de bajos recursos

Utilization of rice husk and household organic waste for biogas production as a sustainable alternative in low-income Peruvian communities

Valeria San Martin Ruiz^{a*}; Brando Luigüi Avalos Varillas^a

^a Universidad Científica del Sur, Lima. Perú.

* Autor correspondal: V. San Martin Ruiz [100039689@cientifica.edu.pe | <https://orcid.org/0000-0001-8122-9082>]
B. L. Avalos Varillas [100040203@cientifica.edu.pe | <https://orcid.org/0000-0002-4760-9169>]

Resumen

En Perú, muchos hogares aún dependen de combustibles poco sostenibles, como la madera y el petróleo, para la preparación de alimentos. Sin embargo, existen recursos que pueden aprovecharse para producir biogás como una alternativa ecológica. Entre ellos, destacan más de 330 mil t de cáscara de arroz y más de 8,4 Mt de residuos orgánicos domésticos, con la cual generar energía limpia y renovable. Este estudio tiene como objetivo determinar la proporción de cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos que permita optimizar el rendimiento en la producción de biogás. Se llevaron a cabo seis tratamientos con diferentes proporciones de cáscara de arroz (4,5, 3,0 y 2,4) y combinaciones con residuos orgánicos domésticos (2,2, 1,5 y 1,2) para evaluar el rendimiento y la eficiencia de productividad. Además, se estimó el flujo de energía sostenible, la proyección del consumo de biogás y la recuperación de la inversión inicial. Las proporciones de 2,4 y 1,5 generaron las mayores tasas de biogás mensuales con 1,91 y 1,75 m³, respectivamente, lo que equivale anualmente a 22,92 y 21 m³. Se requieren 3 a 5 biodigestores para producir entre 5,4 a 8,1 m³ de biogás al mes, suficientes para cubrir la demanda de una familia de cuatro personas y recuperar la inversión inicial de 75 dólares en doce meses del sistema. En conclusión, el empleo de cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos es una alternativa sostenible que mejora la sostenibilidad energética en comunidades peruanas de bajos recursos, generar ahorro económico y reducir la contaminación ambiental.

Palabras clave: biogás; arroz; residuo orgánico; biomasa.

Abstract

In Peru, many households still rely on unsustainable fuels such as wood and oil for food preparation. However, there are resources that can be harnessed to produce biogas as an environmentally friendly alternative. These include more than 330,000 t of rice husks and more than 8.4 Mt of organic household waste, which can be used to generate clean, renewable energy. This study aims to determine the proportion of rice husk and organic household waste to optimize the biogas production yield. Six treatments with different proportions of rice husk (4.5, 3.0 and 2.4) and combinations with household organic waste (2.2, 1.5 and 1.2) were carried out to evaluate the yield and productivity efficiency. In addition, the sustainable energy flow, the projected biogas consumption and the payback of the initial investment were estimated. The ratios of 2.4 and 1.5 generated the highest monthly biogas rates with 1.91 and 1.75 m³, respectively, which is equivalent to 22.92 and 21 m³ annually. Three to five biodigesters are required to produce between 5.4 to 8.1 m³ of biogas per month, enough to cover the demand of a family of four and recover the initial investment of 75 USD in twelve months of the system. In conclusion, the use of rice husks and organic household waste is a sustainable alternative that can improve energy sustainability in low-income Peruvian communities, generate economic savings and reduce environmental pollution.

Keywords: biogas; rice; organic matter; biomass.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

DOI: <http://doi.org/10.17268/agroscl.2025.012>

Recibido: 27/08/2025 | Aceptado: 16/10/2025

1. Introducción

La dependencia global de combustibles sólidos para la cocina representa un desafío significativo para la salud y el medio ambiente. El Banco Mundial (2020) reporta que alrededor de 2,400 millones de habitantes (40% de la población), utilizan leña, carbón y estiércol como fuentes de energía para cocinar; también el 9,5% de la población mundial no tiene acceso a servicios eléctricos (Hollands & Daly, 2023; Kapsalyamova et al., 2021; Li et al., 2022). La combustión de estos combustibles libera contaminantes peligrosos, como material particulado fino (PM_{2.5} y PM₁₀), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂), además de contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero, con graves consecuencias para la salud humana (Ali & Khanb, 2022; Li et al., 2022; Rubinstein et al., 2022; Kapsalyamova et al., 2021).

A nivel mundial, en 2019, aproximadamente 2,3 millones de muertes fueron causadas por exposición a la contaminación de aire doméstico, provocada por la combustión incompleta de combustibles sólidos y kerosene en estufas (Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud, 2021; Islam et al., 2023; Valarezo et al., 2023). En Perú, existen 6682 comunidades campesinas, de las cuales el 25,5% no dispone de servicio eléctrico y el 70% de los pobladores rurales emplean leña en la cocina, en comparación con el 7% en zonas urbanas. Además, solo el 7,2% de la población rural tiene acceso a gas licuado de petróleo (GLP) (INEI, 2017; Nuño et al., 2023).

Estas comunidades de bajos recursos, presentan limitados accesos a servicios esenciales como gas y electricidad, cruciales para actividades diarias como la preparación y conservación de alimentos. Debido a esto, los pobladores recurren a alternativas menos eficientes y más contaminantes, como leña, paja, carbón y kerosene (Oyeniran & Atanda, 2023). La adopción de energías renovables emerge como una alternativa sostenible, promoviendo la eficiencia energética y reduciendo la huella ambiental. En este sentido, la producción de energía a partir de biomasa resulta ser más económica, renovable y sostenible (Kapsalyamova et al., 2021; Li et al., 2022; Rubinstein et al., 2022).

La biodigestión anaeróbica permite transformar los residuos orgánicos a través de microorganismos para generar gas y procesar eficientemente grandes cantidades de residuos orgánicos (Chernicharo, 2019; Alam et al., 2022; Lins et al., 2022; Singh & Kalamdhab, 2022). Los residuos orgánicos domésticos, son ricos en nutrientes y minerales esenciales para los microorganismos, representan una fuente valiosa para la generación de gas.

En Perú, los residuos orgánicos constituyen el 56% de los residuos sólidos generados anualmente (Alam et

al., 2022; Ministerio del Ambiente, 2023; Sanchez et al., 2022); así también, la producción de arroz en el 2023 ascendió a 330,825 t, con un incremento de un 32,5% con respecto al 2022, dentro de esta producción la cáscara de arroz equivale al 25% del peso seco (INEI, 2022; Rashid et al., 2023). La cáscara de arroz posee un alto valor calórico (3736 cal/g), por lo que es una alternativa viable para la producción de biogás (Ramon et al., 2018). Las regiones de mayor producción de arroz son La Libertad, Ancash, Arequipa y San Martín (80,2% de la producción nacional), en la costa norte del Perú, la quema de residuos de arroz libera 380 t/año de cenizas, contribuyendo a la contaminación ambiental en la región (Garzón, 2023; Rodríguez, 2013). Como alternativa para enfrentar los problemas energéticos de las comunidades de bajos recursos, es posible producir biogás a partir de la cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos, que no se cuenta con información de las proporciones para obtener un rendimiento eficiente en la producción de biogás. Por lo que el presente trabajo tuvo como objetivo determinar la proporción óptima de cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos que permita maximizar el rendimiento para la producción de biogás.

2. Metodología

2.1. Recolección y muestreo

Para la producción de biogás, se recolectó cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos. En el Molino San Jorge S.A.C (Lambayeque, Perú) se generan anualmente 151,20 t de cáscara de arroz. De esta cantidad, se tomó una muestra de 180 kg. Para los residuos orgánicos domésticos se consideró 137,871 kg para el distrito de Chiclayo. Se obtuvo una muestra aleatoria de 60 kg, recolectada de cinco viviendas de la urbanización Cerropón, Chiclayo, Lambayeque, Perú. La composición de los residuos orgánicos domésticos recolectados entre el 18 y el 22 de mayo del 2024 se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Composición de residuos orgánicos domésticos.

2.2. Pretratamiento

Los residuos recolectados fueron triturados con la finalidad de incrementar su superficie de contacto y facilitar su descomposición, para luego ser incorporados en el biodigestor anaeróbico e iniciar su proceso de descomposición y obtención de biogás. Los ensayos con los biodigestores se llevaron a cabo en Cerropón, Chiclayo, Lambayeque, Perú. La ubicación se caracterizó por temperaturas diurnas entre 27 °C – 30 °C, y nocturnas entre 17 °C – 20 °C. La presión atmosférica fue alrededor de 1010 hPa, y la precipitación fue inferior a 10 mm.

2.3. Diseño

Se empleó un bidón de polietileno de alta densidad hermético y resistente, con una capacidad de 80 litros. Los residuos pretratados fueron introducidos en el bidón, el cual fue sellado herméticamente. Para la medición del biogás generado, se instaló un sistema de salida en la parte superior del bidón, compuesto por una válvula de esfera con manguera, conectado a través de una "T" de paso a un dispositivo de recolección de gas. Este dispositivo aseguró la captura eficiente del biogás producido, canalizando hacia su destino final, que en este caso fue la cocina Surge® semiindustrial, donde se utilizó como fuente de energía para las mediciones posteriores (Figura 2).

2.4. Preparación del biodigestor

La instalación del biodigestor se estableció de acuerdo con Rojas (2018), que se basó en las densidades de cáscara de arroz (0,15 g/cm³), agua (1 g/cm³) y residuos orgánicos (0,15 g/cm³) para determinar las cantidades de los compuestos en los tratamientos

(Tabla 1). Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones, y las cantidades fueron calculadas utilizando la ecuación de Herrero (2011):

$$K = V_b * C$$

Donde K: Cantidad de contenido para el biodigestor (kg); V_b: Volumen del biodigestor (80 kg); C: Constante de 50%.

$$R : A = Pr : Pa$$

$$R + A = K$$

Donde R: Cantidad de residuo; A: Cantidad de agua; Pr: Proporción de residuo; Pa: Proporción agua; K: Cantidad de contenido.

Tabla 1

Composición de los tratamientos para la producción de biogás

Tratamiento	4,5	2,2	3	1,5	2,4	1,2
Cáscara de arroz (kg)	4,5	2,2	3	1,5	2,4	1,2
Residuos orgánicos domésticos (kg)	0	2,2	0	1,5	0	1,2
Agua (kg)	35,6	35,6	36,9	36,9	37,7	37,7

2.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Los tratamientos evaluados consistieron en distintas proporciones de cáscara de arroz y residuos orgánicos, los cuales se determinaron en base a estudios realizados por Rojas (2018) y Herrero (2011). Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) para evaluar el rendimiento de biogás de cada tratamiento de cáscara de arroz y combinación (cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos). Se comparó la producción de biogás entre los tratamientos 2.4 vs 1.2, 3.0 vs 1.5, y 4.5 vs 2.2, utilizando un análisis de ANOVA con un nivel de significancia del 95%.



Figura 2. Esquema del sistema de producción de biogás.

2.6. Producción de biogás de tratamientos

Se dispuso de cocinas semiindustriales marca Surge® para cuantificar la cantidad de biogás obtenido durante 30 días (30 de abril - 30 de mayo del 2023) utilizando cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos. La medición se llevó a cabo en horas para seis tratamientos diferentes, mediante la conexión de las cámaras de biogás a las cocinas y se evaluó a partir del tiempo de generación de flama derivada del sistema. Posteriormente, se utilizó la ecuación de Rojas (2018) para la proyección en el consumo de biogás en un periodo de 12 meses:

$$\text{Flujo Prod} = \bar{X}Rt * DMax$$

Donde $\bar{X}Rt$: Media de rendimiento de biogás total (horas); $DMax$: Demanda de energía de una cocina semiindustrial ($0,5 \text{ m}^3/\text{h}$); Flujo de producción: Producción total en m^3/mes .

3. Resultados y discusión

3.1. Producción de biogás

La producción de biogás fue variable en los tratamientos del presente experimento. La producción en los tratamientos con cáscara de arroz presentó un rendimiento promedio de $1,18 \pm 0,19$, $1,35 \pm 0,11$ y $1,91 \pm 0,23 \text{ m}^3$ para los tratamientos de 4,5, 3,0 y 2,4 respectivamente, mientras que en la combinación de cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos la producción fue de $1,13 \pm 0,29$, $1,75 \pm 0,13$ y $0,78 \pm 0,17 \text{ m}^3$ para los tratamientos 2,2, 1,5 y 1,2 respectivamente, representado en la Figura 3.

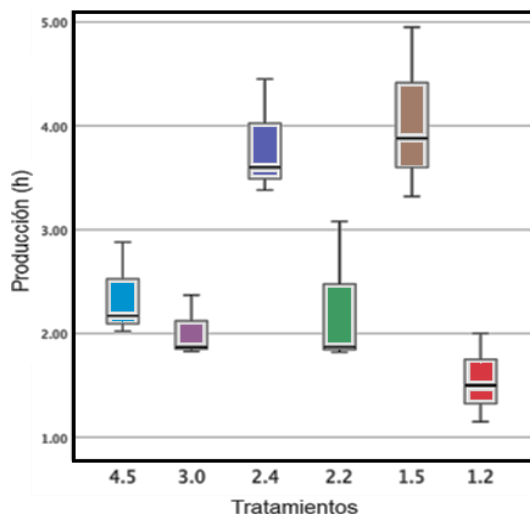


Figura 3. Esquema del sistema de producción de biogás.

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk reveló que la producción en relación con el rendimiento del biogás sigue una distribución normal ($p\text{-value} = 0,192$), permitiendo el uso de métodos paramétricos en el análisis. La prueba de Levene no mostró diferencias significativas en la producción de biogás entre los tratamientos ($p\text{-value} = 0,405$), lo que

sugiere que las varianzas son homogéneas. El ANOVA indicó diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ($p\text{-value} = 0,001$).

La prueba Post Hoc - Tukey presentó diferencias significativas en la producción de biogás. El tratamiento 1.5 generó una producción significativamente mayor en comparación con los tratamientos 4.5 ($p\text{-value} = 0,034$), 3.0 ($p\text{-value} = 0,010$), 2.2 ($p\text{-value} = 0,024$) y 1.2 ($p\text{-value} = 0,002$). Así mismo, el tratamiento 2.4 también mostró una producción significativamente mayor que el tratamiento 1.2 ($p\text{-value} = 0,005$) y 3.0 ($p\text{-value} = 0,024$). Sin embargo, los tratamientos 4.5, 2.2 y 3.0 no presentaron diferencias significativas entre ellos. Así, se identificaron tres subconjuntos homogéneos, estos no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí. El primer subconjunto está conformado por el tratamiento 4.5, 3.0, 2.2 y 1.2 con $p\text{-value} = 0,549$. En el segundo subconjunto, tratamiento 4.5, 2.4 y 2.2 con $p\text{-value} = 0,055$. Finalmente, tercer subconjunto, tratamientos 2.4 y 1.5 con $p\text{-value} = 0,995$.

Se realizó una comparación entre los tratamientos 2.4 vs 1.2, 3.0 vs 1.5, y 4.5 vs 2.2. En la comparación de los tratamientos 2.4 vs 1.2, se observó un incremento en la producción de biogás utilizando exclusivamente cáscara de arroz, con un aumento del 145,8% ($p\text{-value} = 0,007$), lo que indicó que el tratamiento con la combinación 2.4 obtuvo una alta producción de biogás. Las comparaciones entre los tratamientos 4.5 vs 2.2, y 3.0 vs 1.5 no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p\text{-value} = 0,8849$ y $0,1428$ respectivamente), sin embargo, el tratamiento 1.5 de combinación de cáscara de arroz y residuos orgánicos domésticos, mostró un incremento en la producción de biogás del 30,52% con respecto a tratamiento 3.0 (Figura 4).

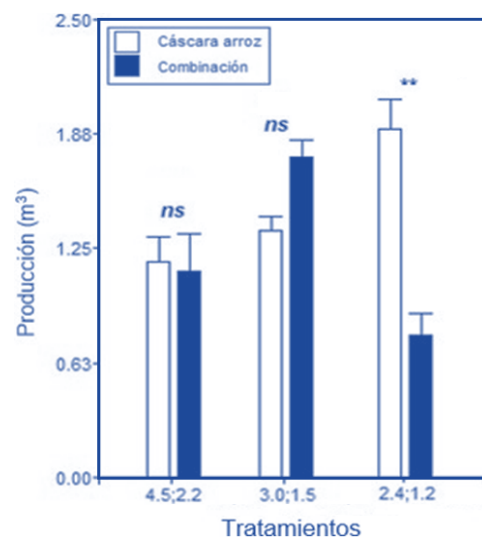


Figura 4. Comparación de tratamientos según la producción de biogás (ns: no presenta diferencia significativa; **: presenta diferencia significativa).

Owamah et al. (2021) mencionó que la adición de inóculo mejoró la producción de biogás a partir de diversos sustratos. Demostró que la optimización de la relación entre inóculo y sustrato influyó significativamente en el rendimiento de biogás, debido a la alta carga microbiana presente en los inóculos, que son sustratos previamente sometidos a digestión anaeróbica. Por lo que, la relación inóculo-sustrato fue una estrategia efectiva para aumentar la producción de biogás. En nuestro estudio, se observó que la selección y proporción de los componentes del sustrato desempeñaron un papel crucial en la eficiencia de la producción de biogás, como lo respalda también la investigación de Nuntón (2018). Nuntón realizó un experimento utilizando 4,51 kg de sustrato en una proporción de 0.1:1:5 de bagazo, estiércol y agua, obteniendo una producción de 0,38 m³ de biogás. Aunque este rendimiento fue inferior al obtenido en nuestro estudio, respaldó la idea de que la composición del sustrato y sus proporciones fueron factores cruciales para la eficiencia de la producción de biogás. Por otro lado, Haider et al. (2015) señaló que el rendimiento del biogás aumentó con una mayor proporción de residuos orgánicos. En su experimento, obtuvo un rendimiento de 0.584 m³ utilizando una combinación de residuos orgánicos domésticos y cáscara de arroz en una proporción de 10.5:1. Este rendimiento fue comparable a los resultados obtenidos en nuestro estudio en el tratamiento 1.5, sugiriendo que una combinación de residuos orgánicos domésticos y cáscara de arroz pudo haber mejorado la eficiencia de la producción de biogás. Además, Rojas (2018) demostró que una proporción de cáscara de arroz y agua de 1:5 produjo 53,971 m³ de biogás a partir de 1000 toneladas de cáscara de arroz, lo que evidenció la importancia de la relación entre los componentes del sustrato. Se destacó que la proporción de cáscara de arroz en el tratamiento pudo haber tenido un impacto significativo en la producción de biogás, como se demostró en nuestro estudio con el tratamiento 2.4, el cual fue el que mostró la mayor producción de biogás, compuesto exclusivamente por cáscara de arroz.

3.2. Rendimiento de los tratamientos

Las medias de rendimiento de producción de biogás mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El mayor rendimiento se observó en los tratamientos 2.4 (cáscara de arroz) y 1.5 (combinación); con tiempos de producción de 3,81 y 3,51 horas y/o 1,91 y 1,75 m³ de biogás respectivamente (Figura 5).

García et al. (2023) mostró que la combinación de residuos orgánicos con cáscara de arroz incrementó la

producción de biogás en comparación con el uso exclusivo de residuos orgánicos domésticos. Asimismo, Chen et al. (2024) destacó que la cáscara de arroz, rica en lignocelulosa, proporcionó una fuente prolongada de carbono durante la digestión anaeróbica, lo que permitió una liberación constante de biogás. Esta liberación extendida contribuyó a una mayor producción total de biogás cuando se combinó con residuos orgánicos. Además, Singh et al. (2024) indicaron que la estructura fibrosa y porosa de la cáscara de arroz mejoró la estabilidad física del medio de digestión, facilitando el contacto entre microorganismos y el sustrato, optimizando las condiciones anaeróbicas.

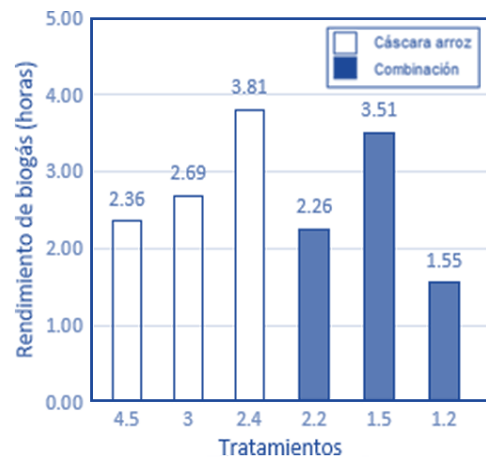


Figura 5. Comparación de rendimiento de biogás.

Patel et al. (2024) mencionaron que la cáscara de arroz equilibró la relación C/N (carbono/nitrógeno) en la combinación, debido a su alto contenido de carbono, previniendo la inhibición de la actividad microbiana causada por el exceso de nitrógeno y la acumulación de amoníaco.

Finalmente, Lee et al. (2024) encontraron que la sílice en la cáscara de arroz actuó como un amortiguador físico, favoreciendo la adherencia de microorganismos y mejorando la eficiencia del proceso de digestión. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, los tratamientos con la inclusión de cáscara de arroz mostraron un aumento significativo en la producción de biogás, debido a las propiedades inherentes de la cáscara de arroz, que contribuyeron a estabilizar el proceso de digestión anaeróbica. La estructura fibrosa y la composición química de la cáscara de arroz favoreció un ambiente más adecuado para la actividad microbiana, lo que a su vez optimizó la producción de biogás. Estos resultados mostraron que la cáscara de arroz puede desempeñar un papel clave como co-sustrato en procesos de digestión anaeróbica, mejorando la eficiencia del sistema.

3.3. Proyección en el consumo de biogás

Al realizar la proyección de los resultados, se demostró que la producción de biogás en un período de 12 meses fue eficiente en los tratamientos 2.4 y 1.5, con valores de 22,92 y 21 m³/mes, respectivamente (Figura 6). Estos resultados confirmaron la viabilidad del sistema a diferente proyección, sino que también destacaron la consistencia y efectividad de los tratamientos implementados, evidenciando su potencial para aplicaciones a mayor proyección en el ámbito de la generación de energía renovable.

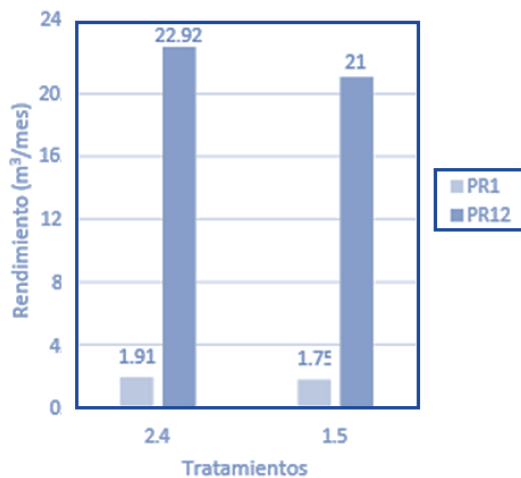


Figura 6. Comparación de rendimiento de biogás.

La producción de biogás a partir de residuos orgánicos, como cáscara de arroz y residuos domésticos, representa una alternativa económica y sostenible para satisfacer las necesidades energéticas de las familias de bajos recursos en Perú (Posmanik et al., 2022).

En este estudio se realizó una proyección del consumo de biogás para el tratamiento 2.4, el cual mostró la mayor producción, con un valor de 22.92 m³/mes durante un periodo de 12 meses. Esta cantidad de biogás podría satisfacer una parte significativa de las necesidades energéticas de las familias.

Una familia promedio de 4 a 5 personas consume solo para cocinar entre 5,4 a 8,1 m³ de gas al mes, lo que equivale aproximadamente de 0.8 a 1.2 balones de gas licuado de petróleo (GLP) de 5 kg (World Biogas Association, 2024). Un balón de gas de 5 kg contiene 6,97 m³ de gas y cuesta alrededor de 8 dólares en el año 2024 (La República, 2024). En comparación, 1.91 m³ de biogás producido al mes a partir de cáscara de arroz equivalen a 0,21 balones de GLP de 5 kg, lo que indica que se necesitan 3 a 5 biodigestores para cubrir el consumo mensual completo de una familia. Por lo tanto, el biogás generado en este estudio puede ser una opción viable para cubrir las necesidades

energéticas de las familias, reduciendo su dependencia del GLP y contribuyendo a una mayor sostenibilidad y ahorro económico.

Mientras que el GLP implica un gasto constante de 115 dólares aproximadamente y sujeto a fluctuaciones de precios, el biogás, tras una inversión inicial de aproximadamente 75 dólares para la instalación del sistema (3 biodigestores), se produce prácticamente de manera gratuita a partir de desechos orgánicos disponibles en el hogar. Este ahorro resulta significativo en economías vulnerables, ya que la inversión se recupera aproximadamente al año, haciéndola rentable. Además de ser más económico a largo plazo, gracias a sus bajos costos operativos, el biogás ofrece importantes ventajas ambientales (Kumar et al., 2022). Su producción reduce la dependencia de combustibles fósiles, minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero y fomenta la economía circular mediante una gestión eficiente de los residuos orgánicos (Mu et al., 2022). El biogás, como fuente de energía local y renovable, también fortalece la seguridad energética de las comunidades.

Un sistema de biogás bien mantenido puede durar muchos años, asegurando un suministro constante de energía (Ramirez-Arpide et al., 2023). Por ello, implementar programas de subsidios o financiamiento para la instalación de sistemas de biogás sería una estrategia efectiva para aumentar la accesibilidad a esta tecnología y fomentar un entorno más sostenible (Gai et al., 2022).

Por otro lado, el residuo sólido resultante de la digestión anaeróbica, conocido como compost, representa un recurso valioso para mejorar la productividad y calidad de los suelos debido a su alto contenido en materia orgánica y nutrientes (Pascual, 2020). Este compost es particularmente beneficioso para las comunidades rurales que dependen de la agricultura como principal fuente de alimentación y comercio. Torres et al. (2022) coinciden en que la utilización de residuos orgánicos es crucial para la sostenibilidad y la protección ambiental, ya que estos residuos actúan como fertilizantes naturales, mejorando la calidad del suelo sin la necesidad de productos químicos.

4. Conclusiones

El estudio evidencia la alta eficiencia en el empleo de sustratos, como la cáscara de arroz y los residuos orgánicos domésticos para la producción de biogás, por su disponibilidad, características físicas y químicas. Estos residuos, al ser optimizados adecuadamente, pueden desempeñar un papel crucial en la provisión de energía sostenible, particularmente en áreas rurales. Por lo tanto, la

implementación de mejoras en los procesos de conversión y gestión del biogás como una fuente de energía renovable, fomentaría la sostenibilidad energética y reduciría la dependencia de fuentes no renovables en comunidades con servicios eléctricos limitados. Además, una gestión eficiente del biogás contribuiría a mitigar la contaminación ambiental derivada de la disposición inadecuada de residuos orgánicos.

Las proporciones 2,4 de cáscara de arroz y 1,5 de la combinación de sustratos generaron las mayores tasas de biogás, con producciones mensuales de 1,91 m³ y 1,75 m³ respectivamente. Anualmente, esto equivale a 22,92 m³ y 21 m³ de biogás, lo que representa una alternativa sostenible para comunidades peruanas de bajos recursos. Con 1,91 m³ de biogás al mes, equivalentes a 0,21 balones de GLP de 5 kg, se requerirían entre 3 y 5 biodigestores para cubrir el consumo de una familia, reduciendo la dependencia del GLP y generando un ahorro económico de 115 dólares al año de la instalación del sistema.

Se recomienda estandarizar los procedimientos para su aplicación a gran escala. Asimismo, es crucial implementar inóculos que optimicen la degradación de la materia orgánica para mejorar y aumentar la producción de biogás. Esto contribuirá significativamente al desarrollo de una alternativa energética más sostenible.

Referencias bibliográficas

- Alam, M., Sultan, M. B., Mehnaz, M., Fahim, C. S. U., Hossain, S., & Anik, A. H. (2022). Producción de biogás a partir de residuos de alimentos en digestor anaeróbico seco a escala de laboratorio en condiciones mesófilas. *Nexo de Energía*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100126>
- Ali, J., & Khan, W. (2022). Factors influencing access to clean cooking fuel among rural Indian households during the COVID-19 pandemic. *Energy for Sustainable Development*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.01.006>
- Auris, R. I., & Morales, F. K. (2019). Evaluación de la influencia de la temperatura en el tiempo de producción de biogás de excretas de bovino en el centro poblado de Callqui Grande – Huancavelica [Tesis de pregrado, Universidad de Huancavelica].
- Ávila, M., Campos, R., Brenes, L., & Jiménez, M. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Tecnología en Marcha*, 31(2), 159–170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>
- Cárdenas, J., Díaz, Á., Chang, D., & Cruz, D. (2023). Efectos del biol (efluente industrial modificado) sobre el rendimiento del cultivo vainita (*Phaseolus vulgaris* L.). *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 7(19), 45–57.
- Chen, X., & Liu, Y. (2024). The role of rice husk in improving biogas production from mixed organic waste: Experimental and theoretical perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 1089–1099. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.1089>
- Chernicharo, C. A. L. (2019). Reactores anaerobios (2.ª ed.). Belo Horizonte: UFMG.
- Crespo, A. A. (2020). Obtención de biogás utilizando como base el estiércol de ganado vacuno en la parroquia La Unión, cantón Babahoyo, provincia de Los Ríos [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo].
- Durazno, P. L., & Jaime, E. A. (2023). Obtención de un biocombustible a partir de biomasa de cáscara de coco y cáscara de arroz como fuente de energía [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil].
- Gai, Q., & Ren, J. (2022). Biogas production from co-digestion of food waste and waste activated sludge: Economic analysis and policy implications. *Bioresource Technology*, 343, 126087. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126087>
- García, A., & Gonzalez, M. (2023). Optimizing biogas yield from agricultural residues: The role of rice husk in anaerobic digestion. *Waste Management*, 142, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.026>
- Garzón, P. A. (2023). Evaluación de alternativas de producción más limpia para el aprovechamiento de la cáscara de arroz [Monografía de especialización, Universidad de América].
- Haider, M. R., Zeshan, Yousaf, S., Malik, R. N., & Visvanathan, C. (2015). Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production. *Bioresource Technology*, 190, 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.105>
- Herrero, J. (2011). Reduced hydraulic retention times in low-cost tubular digesters: Two issues. *Biomass and Bioenergy*, 4, 481–484.
- Hollands, A. F., & Daly, H. (2023). Modelado del logro integrado de objetivos de acceso a cocinas limpias y mitigación climática: un enfoque de optimización de sistemas de energía. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113054>
- Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud. (2021). Carga mundial de morbilidad por la contaminación del aire en los hogares.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). I Censo de comunidades campesinas 2017. Resultados definitivos. Tomo I.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). Perú: Panorama Económico Departamental. Nota de Prensa del INEI del 25 de julio de 2022.
- Islam, S., Rana, J. Md., & Shupler, M. (2023). Deepening socioeconomic inequality in clean cooking fuel use in India from 2005–2006 to 2015–2016. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17041>
- Kapsalyamova, Z., Mishra, R., Kerimray, A., Karymshakov, K., & Azhgaliyeva, D. (2021). Why access to energy is not sufficient for selecting clean cooking fuels? Evidence from a multinomial logit model. *Journal of Environmental Management*, 290, 112539. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112539>
- Kumar, A., Mathur, J., & Sharma, M. P. (2022). Recent developments in biogas production: Strategies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111822.
- LaPlue, L. D. (2022). Consecuencias ambientales de la desregulación de precios en boca de pozo de gas natural.

- Revista de Economía y Gestión Ambiental*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102728>
- Lee, H., & Kim, S. (2024). Effects of rice husk addition on the efficiency of organic waste anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management*, 320, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.01.018>
- Li, H., Ai, X., Wang, L., & Zhang, R. (2022). Energy substitution strategies for cooking: Use gas or electricity? *Journal of Environmental Management*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114135>
- Lins, L. P., Padilha, J. C., Furtado, A. C., & Mito, J. Y. de L. (2022). El uso energético del biogás como herramienta para los objetivos del desarrollo sostenible. *Interações (Campo Grande)*, 23(4), 1275–1286. <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3704>
- Ministerio del Ambiente. (2020). Alrededor de 93 mil toneladas de residuos sólidos fueron valorizados en el 2020 a nivel nacional. Nota de Prensa del MINAM, del 27 de abril de 2021.
- Mu, Y., Yu, H., & Zhang, S. (2022). Optimization and economic assessment of biogas production from agricultural residues: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132306.
- Nuntón, S. H. (2018). Influencia de la temperatura y pH en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un digestor batch [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
- Nuño, N., Mäusezahl, D., Hartinger, S. M., Riley, A. R., Verastegui, H., Wolf, J., Muela, J., & Paz, V. A. (2023). Acceptance and adoption of improved biomass stoves in Peru: learning from system-level approaches to scale up cooking interventions. *Energy Research & Social Science*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102958>
- Owamah, H. I., Ikpeseni, S. C., Alfa, M. I., Oyebisi, S. O., Gopikumar, S., Olusegun, D., & Ilabor, S. C. (2021). Influence of inoculum/substrate ratio on biogas yield and kinetics from the anaerobic co-digestion of food waste and maize husk. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*.
- Oyeniran, W. I., & Atanda, W. (2023). Patterns and determinants of domestic fuel choice for cooking in Nigeria. *Energy*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127753>
- Pascual, J. (2020). Valorización ambiental de los residuos generados en Canarias: ahorro energético y/o compostaje.
- Patel, R., & Patel, P. (2024). Biogas production from rice husk and mixed organic wastes: Insights into microbial community dynamics and process optimization. *Bioresource Technology*, 372, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128137>
- Posmanik, R., Pagès-Díaz, J., Monlau, F., Ferrer, I., & Schmidt, J. E. (2022). Techno-economic and life cycle assessment of biogas upgrading technologies for small-scale energy generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111937.
- Qiu, X., Jin, J., He, R., & Zhang, C. (2023). Do solid cooking fuels lead to higher prevalence of respiratory diseases? Empirical evidence from rural China. *Energy for Sustainable Development*, 74, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.03.020>
- Ramirez-Arpide, F. R., & Alvarez, V. E. (2023). Implementation of small-scale biogas plants in rural areas: A case study in Latin America. *Journal of Environmental Management*, 331, 117224.
- Rashid, J., Bhatti, T. T., Hassan, M., Barakat, M. A., Kumar, R., & Xu, M. (2023). Enhancement in anaerobic biogas conversion via visible-light photocatalytic pretreatment of rice husk with titanium dioxide/indium vanadate nanocomposite. *Fuel*, 346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128289>
- Rojas, C. (2018). Generación de biogás a partir de la cáscara de arroz para reducir costos energéticos en la piladora La Merced S.R.L. [Tesis de titulación, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].
- Rubinstein, F., Mbatchou B. H., Nilsson, M., Baame, M. B., Betang, E., Pascal, A., Chapungu, V., Pope, D., & Puzzolo, E. (2022). Adoption of electricity for clean cooking in Cameroon: a mixed-methods field evaluation of current cooking practices and scaling potential. *Energy for Sustainable Development*, 71, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.010>
- Sanchez, L., Carrier, M., Cartier, J., Charmette, C., Heran, M., Steyer, J. P., & Lesage, G. (2022). Enhanced organic degradation and biogas production from domestic wastewater at psychrophilic temperature using a submerged anaerobic granular membrane bioreactor for energy-positive treatment. *Bioresource Technology*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127145>
- Singh, N., & Gupta, R. (2024). Assessment of biogas yield and process stability during co-digestion of rice husk and organic waste. *Sustai Ener Techn and Assessments*, 50, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.105>
- Singh, P., & Kalamdhad, A. S. (2022). Evaluation of small-scale biogas digesters and their impact on the domestic cooking sector in India: environmental, economic and resource analysis. *Energy for Sustainable Development*, 70, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.07.018>
- Torres, F., Vega, B., Ramírez, R., Hernández, F., & García, J. (2022). Diseño y validación de una clasificadora mecánica para residuos orgánicos municipales. *Ingenio Magno*, 13(1), 113–124.
- Valarezo, A., Dávila, L., Bejarano, M. L., Nolivos, I., Molina, E., Schlesinger, S. B., Gould, C. F., & Jack, D. F. (2023). Clean and resilient cooking: sustaining clean cooking in the home in Ecuador during the COVID-19 pandemic. *Energy for Sustainable Development*, 74, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.03.018>
- Vera-Romero, I., Martínez-Reyes, J., Estrada-Jaramillo, M., & Ortiz-Soriano, A. (2014). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica: Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 15(3), 429–436.
- World Biogas Association. (2024). Biogas as cooking fuel: How much is enough? <https://www.worldbiogasassociation.org/biogas-cooking-fuel/>