



ID del documento: IJJ-Vol.3.N.2.007.2025

Tipo de artículo: Investigación

Evaluación de la co-digestión de estiércol porcino, estiércol avícola, cascara de banano y gallinaza (estiércol avícola con cáscara de arroz) para la producción de biogás

Evaluation of co-digestion of pig manure, poultry manure, banana peel and chicken manure (poultry manure with rice husk) for biogas production

Autores:

Ofelia Alexandra Granda Morocho¹, Diego Joel Jumbo Robles², Janner Mauricio Apolo Valle³, Hugo Ítalo Romero Bonilla⁴

¹Universidad Técnica de Machala, Ecuador, ogranda@utmachala.edu.ec <https://orcid.org/0000-0001-8850-8180>

²Universidad Técnica de Machala, Ecuador, djumbo7@utmachala.edu.ec <https://orcid.org/0009-0002-0510-6843>

³Universidad Técnica de Machala, Ecuador, Japolo12@utmachala.edu.ec <https://orcid.org/0009-0008-0803-6098>

⁴Universidad Técnica de Machala, Ecuador, hromero@utmachala.edu.ec , <https://orcid.org/0000-0002-7846-0512>

Corresponding Author: Granda Morocho Ofelia Alexandra, ogranda@utmachala.edu.ec

Reception date: 05-may-2025

Acceptance: 20-may-2025

Publication: 04-jun-2025

How to cite this article:

Granda Morocho, O. A., Jumbo Robles, D. J., Apolo Valle, J. M. ., & Romero Bonilla, H. Ítalo . (2025). Evaluación de la co-digestión de estiércol porcino, estiércol avícola, cascara de banano y gallinaza (estiércol avícola con cáscara de arroz) para la producción de biogás. Innovarium International Journal, 3(2), 1-19.
<https://revinde.org/index.php/innovarium/article/view/48>



Resumen

La generación de energía renovable a partir de biogás fue evaluada mediante tres biodigestores que utilizaron distintas mezclas de sustratos orgánicos, incluyendo estiércol porcino, estiércol avícola, gallinaza, cáscara de banano y agua, sometidos a un proceso de descomposición anaeróbica. Durante un periodo de seis semanas se monitoreó diariamente la producción de gases como metano, hidrógeno, gas licuado de petróleo (GLP), monóxido de carbono, etano y propano. La combinación conformada por estiércol porcino, cáscara de banano y agua registró los niveles más altos de generación de gases, destacándose con 518.000 ppm de metano, 292.900 ppm de hidrógeno, 196.767 ppm de GLP, 2.072,417 ppm de monóxido de carbono, 739.092 ppm de etano y 172.383 ppm de propano. Esta mezcla resultó ser la más eficiente debido a su adecuada proporción de carbono y nitrógeno, así como al alto contenido de materia orgánica fácilmente degradable, lo que favoreció la acción de los microorganismos metanogénicos. En síntesis, el estudio respalda al biogás como una alternativa sustentable frente a los combustibles fósiles, y resalta el potencial de la codigestión de estiércol porcino con residuos vegetales como estrategia eficaz para la producción descentralizada de energía limpia.

Palabras clave: Biogás, biodigestor, biocombustible, gas metano, LPG (gas licuado de petróleo).

Abstract

The generation of renewable energy from biogas was evaluated using three biodigesters that utilized different mixtures of organic substrates, including pig manure, poultry manure, chicken manure, banana peel, and water, subjected to an anaerobic decomposition process. Over a period of six weeks, the production of gases such as methane, hydrogen, liquefied petroleum gas (LPG), carbon monoxide, ethane, and propane was monitored daily. The combination of pig manure, banana peel, and water recorded the highest levels of gas generation, standing out with 518,000 ppm of methane, 292,900 ppm of hydrogen, 196,767 ppm of LPG, 2,072,417 ppm of carbon monoxide, 739,092 ppm of ethane, and 172,383 ppm of propane. This mixture proved to be the most efficient due to its appropriate carbon-to-nitrogen ratio, as well as its high content of easily degradable organic matter, which favored the action of methanogenic microorganisms. In summary, the study supports biogas as a sustainable alternative to fossil fuels and highlights the potential of co-digesting pig manure with plant residues as an effective strategy for the decentralized production of clean energy.

Keywords: Biogas, biodigester, biofuel, methane gas, LPG (liquefied petroleum gas).

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos orgánicos procedentes de la ganadería, la agricultura y la agroindustria representan un desafío debido a la contaminación ambiental derivada de la emisión de gases nocivos capaces de inducir enfermedades. Numerosas naciones almacenan estos desechos en depósitos de residuos con el objetivo de mitigar su impacto ambiental. Los residuos de origen orgánico en proceso de descomposición generan gases como el metano y el dióxido de carbono. (Meyer, Ehimen, & Holm-Nielsen, 2018), que podría ser empleado en la generación de energía renovable.

La producción de energía renovable, tales como el biogás, ha ganado importancia significativa. El biogás se produce mediante la descomposición anaeróbica de materia orgánica en digestores, donde las bacterias descomponen los residuos en condiciones de insuficiencia de oxígeno, resultando en la generación de biometano. Este metano es recolectado y utilizado tanto en la generación de combustible como en la generación de electricidad (Ramírez, Parra, Zárate Chaves, & Moreno Bernal, 2010).

La producción avícola desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria global, proporcionando una fuente considerable de proteínas de alta calidad a una población en constante crecimiento. Sin embargo, este sector no está exento de impactos ambientales significativos. Desde la emisión de gases de efecto invernadero hasta la generación de residuos, el sector avícola plantea desafíos considerables para la sostenibilidad ambiental (ABCavícola, 2024).

La investigación tiene como objetivo la utilización de la materia orgánica a través de biodigestores para la generación de biogás, con el objetivo de minimizar los residuos y los gases de efecto invernadero que se generan.

1.1 . Biogás

La digestión anaeróbica (AD) continúa siendo ampliamente empleada en la generación de biogás, debido a la robustez de sus configuraciones y diseños primordiales. En primer lugar, funciona como una plataforma de tratamiento que reduce volúmenes significativos de materiales orgánicos complejos, transformando la mayoría de estos en monómeros, tales como metano y dióxido de carbono (componentes de biogás). Adicionalmente, el sustrato enriquecido con nutrientes producido por el proceso de Adquisición de Datos se recicla primordialmente en terrenos agrícolas, desempeñando un papel de fertilizante orgánico. Esta práctica cada vez más sustituye a los fertilizantes químicos y atenúa los impactos ambientales adversos, tales como la eutrofización de los sistemas de agua dulce, que se producirían en caso de una gestión inadecuada de la eliminación de estos nutrientes (Lauka et al., 2019).

El proceso de digestión anaeróbica constituye un proceso biológico mediante el cual los microorganismos descomponen materia orgánica en la ausencia de oxígeno, generando biogás como producto secundario. Este procedimiento se subdivide en cuatro etapas consecutivas:

Hidrólisis: A lo largo de esta etapa inicial, compuestos orgánicos de alta complejidad, tales como polisacáridos, lípidos y proteínas, son degradados en moléculas más sencillas mediante la acción de enzimas hidrolíticas. Este procedimiento reviste una importancia crucial, ya



que convierte polímeros insolubles en monómeros solubles, los cuales pueden ser utilizados por otros microorganismos en las etapas subsecuentes.

Elaboración del proceso de acidificación. Los monómeros resultantes de la hidrólisis son fermentados por bacterias acidogénicas, lo que conduce a la generación de ácidos grasos volátiles, incluyendo ácido acético, propiónico y butírico, alcoholes, dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂). Esta etapa prepara los compuestos requeridos para la etapa posterior de acetogénesis.

La acetogénesis alérgica: En esta fase, las bacterias pertenecientes a la familia acetogénica convierten los productos de la acidogénesis en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Este método se vuelve esencial para la producción eficiente de metano en la fase posterior.

Procedimiento de Metanogénesis: La etapa final se lleva a cabo a través de arqueas metanógenas, que utilizan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono para la generación de metano (CH₄) y dióxido de carbono, respectivamente. Esta fase es esencial para la conversión de la materia orgánica en biogás, que puede ser utilizado como fuente de energía renovable. (EPCM Holdings, 2024)

El biogás se constituye primordialmente de metano (50-70%) y dióxido de carbono (30-50%), con presencia de gases adicionales como hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua. Su composición fluctúa en función de la biomasa empleada en el proceso de digestión anaeróbica (EPCM Holdings, 2024). La eficacia de las instalaciones de producción de biogás está condicionada por diversos factores, entre los que se incluye el tipo de biomasa utilizada, dado que las materias con un alto contenido de carbohidratos y grasas producen un mayor volumen de biogás en comparación con aquellas con un elevado contenido de lignina (EPCM Holdings, 2024). La eficacia en la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica se ve afectada por una variedad de factores operativos. La proporción ideal entre carbono y nitrógeno (C/N) se sitúa entre 20:1 y 30:1 para prevenir la acumulación de ácidos grasos volátiles y amoníaco, compuestos que pueden inhibir la actividad microbiana y disminuir la generación de metano (Springer, 2025). Adicionalmente, el tiempo de retención hidráulica (TRH) desempeña un papel fundamental; investigaciones contemporáneas han evidenciado que un TRH de alrededor de 33 días es óptimo para la generación de biogás a partir de estiércol de cabra, con una composición de biogás que puede llegar hasta un 58,53% de metano (Aghogho & Osubor, 2024). Además, la inhibición provocada por el amoníaco representa un obstáculo considerable en la digestión anaeróbica, particularmente cuando se emplean sustratos ricos en nitrógeno. Las concentraciones elevadas de amoníaco libre (NH₃) pueden influir de manera adversa en la actividad de las arqueas metanógenas, las cuales son fundamentales para la generación de metano (ACS Publications, 2023). En consecuencia, resulta esencial supervisar y regular estos parámetros con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica.

Las diversas variaciones en la composición orgánica y en el contenido de materia seca (1,5%-30%), provocan modificaciones en el biogás generado. La codigestión es comúnmente utilizada debido a que la proporción óptima de carbono a nitrógeno para la generación de biogás se sitúa entre 20:1 y 30:1. No obstante, el estiércol suele tener una proporción reducida de carbono, lo que hace esencial su combinación con otros sustratos ricos en carbono para optimizar la generación de biogás (Machado, 2020), (Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito, 2020)

La generación de biogás, pese a sus beneficios medioambientales, enfrenta una serie de retos que inciden en su eficiencia. Uno de los desafíos más significativos radica en la variabilidad en la composición de los sustratos empleados, tales como estiércoles y desechos agrícolas, que puede modificar la actividad microbiana y la generación de metano. Esto demanda ajustes frecuentes en las condiciones operativas del proceso de digestión anaeróbica, lo que exige modificaciones continuas en las condiciones operativas del proceso de digestión anaeróbica (Koch et al., 2021). Adicionalmente, materiales con un elevado contenido de lignina, como ciertos desechos agrícolas, exhiben mayor resistencia a la descomposición, lo que restringe la eficacia del proceso y exige pretratamientos que potencien la biodegradabilidad (Martínez et al., 2020). Un reto adicional radica en la administración de aromas, dado que compuestos volátiles como el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco pueden provocar molestias y riesgos para la salud. Esta circunstancia exige la implementación de sistemas de regulación de olores para prevenir efectos adversos en el ambiente circundante (Van Der Zee et al., 2021).

1.2 . Definición de biomasa

La biomasa es la materia orgánica renovable que se obtiene de manera natural en los ciclos biológicos de la naturaleza y que puede ser utilizada para la producción de energía eléctrica, lumínica o calórica, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de fuentes energéticas limpias (Oliva, Lopetry, González, & Pedraza, 2004)

1.3 . Cáscara de banano

La estructura está formada por una combinación de celulosa, hemicelulosa y lignina, elementos fundamentales para su composición. El lugar de procedencia de las materias primas es un factor determinante en la composición y proporción de estos elementos constituyentes. Asimismo, es fundamental destacar que también constituye una relevante fuente de materias primas celulósicas, las cuales son esenciales para la fabricación de diversos productos industriales (Martínez-Cardozo, Cayón-Salinas, & Ligarreto-Moreno, 2016).

1.4 . Cáscara de arroz

El coeficiente de conductividad térmica de la cascarilla de arroz, un material utilizado en diversas aplicaciones industriales, es de 0.04 W/mK, lo que lo convierte en un material con propiedades aislantes destacadas. Además, su volumen poroso, que alcanza el 54%, contribuye significativamente a su capacidad para retener el calor y mantener una temperatura estable en diferentes entornos. Debido a su excepcional estabilidad bioquímica y su destacado comportamiento ignífugo, se utiliza de manera frecuente como componente principal en sofisticados sistemas de aislamiento térmico. También es importante destacar que este producto cuenta con una concentración notablemente elevada de silicio, un mineral esencial para la salud de la piel y el cabello. (entre el 90 y el 97% de dióxido de silicio) y es extremadamente rica en valiosos componentes lignocelulósicos (Llanos, 2016).

1.5 . Gallinaza

La gallinaza, un subproducto de la producción avícola, tiende a volatilizarse rápidamente en condiciones de humedad elevada y debido a la presencia de altas concentraciones de nitrógeno en su composición. Este fenómeno puede tener un impacto significativo en el ambiente y en la calidad del aire circundante. velozmente (Tobar & Egas, 2002),

(Montesdeoca & Salazar, 2020). Debido a su excepcional riqueza orgánica y su elevado aporte de nutrientes esenciales como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, la gallinaza, cuya composición puede presentar variaciones significativas en función de la dieta suministrada a las aves y del tipo de sistema de crianza empleado, se emplea de manera habitual como un valioso fertilizante natural que contribuye a potenciar tanto la estructura como la fertilidad del suelo (Nieto & González, 2018; Jardinería Ideal, 2025).

1.6 . Estiércol porcino

El estiércol porcino, también conocido como purín, es una combinación de orina, agua proveniente de la limpieza de los corrales, restos de alimento y agua que no se aprovecha de manera eficiente. Tiene un gran valor agronómico debido a que se puede emplear como un excelente abono orgánico en el proceso de cultivo, sin generar impactos ambientales de relevancia. Si no es gestionado de manera apropiada y responsable, puede tener un impacto altamente perjudicial en el entorno natural, afectando de forma significativa la calidad del suelo, del agua y del aire (Moreno Ayala & Cadillo Castro, 2018).

1.7 . Estiércol avícola

Es un subproducto orgánico altamente contaminante que surge como consecuencia de la crianza intensiva de aves en condiciones de hacinamiento, conformado mayoritariamente por excretas, residuos de alimentos y plumas desechadas. Este producto se puede utilizar de manera efectiva para enriquecer y fortalecer la calidad de los suelos, lo que resulta beneficioso para el crecimiento y desarrollo de las plantas en el entorno. En determinadas circunstancias específicas, con el propósito de prevenir la presencia de olores desagradables, puede ser indispensable llevar a cabo un tratamiento adecuado. La digestión anaerobia es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, el cual tiene la capacidad de generar biogás utilizado para la producción de energía eléctrica y/o térmica. Asimismo, durante este proceso se genera un subproducto líquido conocido como lixiviado, el cual posee propiedades fertilizantes beneficiosas para la agricultura y la nutrición del suelo (Bernal Patiño & Suárez Ramírez, 2018).

En la **tabla 1** se identifican los rendimientos de metano y biogás de las diferentes biomásas:

	<i>Rendimiento de metano, %</i>	<i>Rendimiento de biogás, m³/t</i>
Estiércol de ganado (líquido)	60	25
Estiércol de ganado	60	45
Estiércol de porcino (líquido)	65	28
Estiércol de porcino	60	60
Estiércol de aves de corral	60	80
Ensilaje de maíz	52	202
Ensilaje de hierba	52	172
Residuo orgánico	61	100

Fuente: (Blumberga, Veidenbergs, Romagnoli, Rochas, & Žandeckis, 2011)

2. METODOLOGÍA

Se realizó un análisis detallado para evaluar la efectividad y la viabilidad del uso de diferentes tipos de biomasa animal en la producción de biogás. Este estudio incluyó un examen minucioso de las propiedades físico-químicas de cada tipo de biomasa y una evaluación cuidadosa de su capacidad para ser utilizada como una fuente significativa de energía renovable.

El enfoque metodológico que se empleó para llevar a cabo este proyecto se basó en un razonamiento lógico deductivo, centrado en el aprovechamiento de la biomasa como materia prima para la producción de biogás. Los animales y su análisis comparativo en relación con su comportamiento, fisiología y adaptación al medio ambiente fueron temas de gran relevancia en el campo de la biología. Estudiar las similitudes y diferencias entre distintas especies animales permitió comprender mejor la evolución y la diversidad de la vida en la Tierra (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020a, 2020b).

Las muestras recolectadas para la fabricación de estos biodigestores se enfocaron principalmente en una granja, específicamente en la Granja San Vicente, ubicada en el cantón Balsas. Fue en este lugar donde logramos adquirir los tres tipos de biomásas necesarios para llevar a cabo el experimento y así poder determinar con certeza cuál de ellas es la más idónea. Las biomásas que logramos recolectar fueron las siguientes: estiércol porcino, estiércol avícola, gallinaza (mezcla de estiércol avícola y cáscara de arroz). Estas muestras fueron recolectadas cuidadosamente en envases plásticos esterilizados y sellados herméticamente para prevenir cualquier tipo de contaminación y así mantener intactas sus valiosas composiciones (Ramírez, Medrado, & Escobedo-Cazán, 2020). Las muestras fueron cuidadosamente trasladadas a la Universidad Técnica de Machala, específicamente al laboratorio de Electroanalítica de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud. Se emplearon tres prototipos sellados, cada uno con distintas combinaciones de biomasa y agua, incluyendo cáscara de banano como material adicional para el estudio. Los prototipos fueron diseñados y contruidos conforme a estrictas normas de seguridad y calidad, con el objetivo de obtener resultados precisos y confiables en la investigación.

El estiércol porcino, el estiércol avícola y la gallinaza fueron cuidadosamente combinados con cáscara de arroz y agua en proporciones previamente calculadas, siguiendo rigurosamente las recomendaciones descritas en la literatura científica especializada. Posteriormente, las mezclas fueron inoculadas con bacterias metanogénicas, con el propósito de incrementar significativamente la eficiencia en la generación de biogás. Estos microorganismos resultaron esenciales para facilitar el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica, promoviendo la producción de gases combustibles. Los biodigestores se mantuvieron en un ambiente estrictamente anaeróbico y a temperatura controlada, condiciones indispensables para favorecer la actividad óptima de las bacterias metanogénicas. Se realizaron mediciones diarias de la producción de biogás mediante sensores especializados, lo que permitió cuantificar con precisión los niveles de metano, dióxido de carbono y otros gases generados durante el proceso. Asimismo, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los biogases producidos, así como del digestato resultante, con el fin de determinar su viabilidad como fertilizante orgánico de alta calidad (Retto, 2019).

Además, se llevó a cabo una comparación detallada de los rendimientos de biogás obtenidos en cada uno de los prototipos desarrollados, con el propósito de identificar con precisión cuál de las combinaciones de biomasa empleadas resultó ser la más eficaz tanto en términos de producción energética como de sostenibilidad ambiental (Ávila-Hernández, Campos-Rodríguez, Brenes-Peralta, & Jiménez-Morales, 2018).

La producción de biogás a partir de residuos orgánicos, como la cáscara de banano y el estiércol, no solo ofrece una excelente alternativa de combustible sostenible, sino que también contribuye de manera significativa a la reducción de los impactos ambientales negativos ocasionados por el uso de combustibles fósiles convencionales.

Finalmente, el adecuado manejo y aprovechamiento de estos residuos contribuye de manera significativa a la preservación del medio ambiente, al reducir la cantidad de desechos orgánicos que se acumulan y mitigar el impacto negativo de las emisiones de gases de efecto invernadero en nuestra atmósfera. La implementación de este proyecto permite la producción de biogás como una fuente de energía renovable y sostenible, lo cual contribuirá significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al fomento de prácticas ambientalmente responsables en nuestra sociedad (Ramírez, Parra, Zárate Chaves, & Moreno Bernal, 2010).

2.1. Variables independientes y dependientes

En la investigación se determinaron las variables independientes y dependientes, las cuales se detallan en la Tabla 2, sirviendo como base para el análisis experimental y la interpretación de los resultados obtenidos.

Tabla 2. Variables de estudio para la elaboración de biogás a partir de diferentes biomásas vegetal y animal.

<i>Variables independientes</i>	<i>Variables dependientes</i>
Estiércol porcino	Hidrogeno
Estiércol avícola	LPG (gas licuado de
Gallinaza	Metano
	Monóxido de carbono
	Etano
	Propano

Fuente: Elaboración propia

Se recolectaron diversas biomásas destinadas al llenado de los biodigestores, asegurando la representatividad y calidad de los sustratos utilizados en el proceso experimental.

Figura 1. Recolección de las biomasas, estiércol.



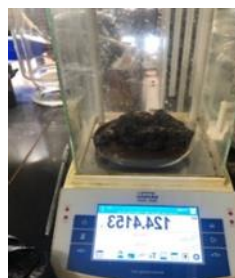
Se procedió a moler la cáscara de banano destinada al experimento, con el fin de facilitar su descomposición y optimizar su integración en las mezclas utilizadas en los biodigestores.

Figura 2. Molienda de la cáscara de banano



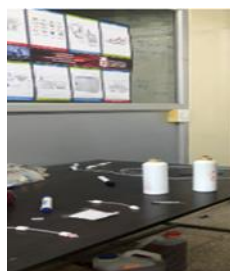
Se pesó la cantidad de cáscara de banano que sería mezclada con agua en proporciones iguales para los tres prototipos, asegurando la uniformidad en la preparación de las mezclas experimentales.

Figura 3. *Pesado de los diferentes insumos de la formulación*



Se colocó en los biorreactores una proporción determinada de estiércol, biomasa vegetal y agua, siguiendo las formulaciones establecidas para cada uno de los prototipos evaluados.

Figura 4. *Acondicionamiento de los biorreactores*



Se dejó reposar la mezcla durante un día para permitir el inicio de la actividad biológica en los biodigestores, controlando cuidadosamente la presión interna para evitar sobrecargas y liberando el exceso de biogás generado en esta etapa inicial.

Figura 5. *Etapas de reposo de los biorreactores*



A partir del segundo día se iniciaron las mediciones diarias, las cuales se prolongaron de manera continua hasta la sexta semana, registrando los niveles de gases producidos en cada uno de los biodigestores.

Figura 6. *Determinación de las mediciones*



2.3 Modelo estadístico

Se utilizó un modelo de diseño de mezcla, ya que la experimentación se basó en una superficie de respuesta compuesta por varios componentes. A cada biorreactor se le asignó una combinación específica de tres elementos: estiércol, cáscara de banano y agua, a excepción del prototipo con gallinaza, el cual incluyó una proporción predefinida de cascarilla de arroz y estiércol avícola. Para el análisis estadístico se empleó el software Minitab 19 con el diseño centroide simplex, el cual permitió una adecuada cobertura del espacio experimental y facilitó la obtención de información detallada sobre el comportamiento interno de la superficie de respuesta.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis de los tres biorreactores nos indica que la mezcla de estiércol porcino y cáscara de banana es más eficiente para la producción de biogás, según lo investigado por (Masache Bravo & Jiménez Romero, 2024), la eficiencia de esta combinación se debe a su balance óptimo de nutrientes y composición orgánica, que favorece la actividad microbiana necesaria para la generación de biogás. El segundo biorreactor estiércol avícola con cascara de banana y tercer biorreactor gallinaza con cascara de banana son viables, pero no alcanzan los mismos niveles de eficiencia del primer biorreactor, según lo investigado por Koch, Han y Wang (2021), debido a los altos niveles de nitrógeno y humedad en el estiércol avícola y la gallinaza, que afectan negativamente la producción de biogás.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el monitoreo de las variables de respuesta en los tres prototipos de biodigestores evaluados. Las mediciones se realizaron de forma diaria durante un periodo de seis semanas, utilizando sensores especializados para cuantificar la producción de distintos gases generados en el proceso de digestión anaeróbica. La Tabla 3 muestra los valores acumulados de hidrógeno, gas licuado de petróleo (GLP), metano, monóxido de carbono, etano y propano, permitiendo comparar el desempeño energético de cada combinación de biomasa utilizada.

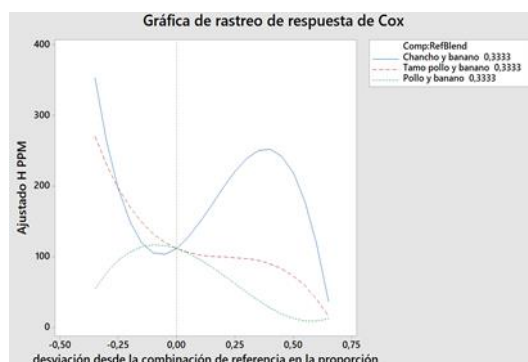
Tabla 3. Valores acumulados de hidrógeno, gas licuado de petróleo (GLP), metano, monóxido de carbono, etano y propano

<i>Variables de respuesta</i>	<i>Biorre actor 1</i>	<i>Biorre actor 2</i>	<i>Biorre actor 3</i>
Hidrogeno	292,900	5,667	54,950
LPG	196,767	4,342	32,767
Metano	518,000	6,008	165,517
Monóxido de	2072,41	12,917	1169,483
Etano	739,092	4,192	126,992
Propano	172,383	3,300	34,867

Fuente: Elaboración Propia

La siguiente figura ilustra la proporción de los componentes utilizados en los biodigestores en relación con la producción de hidrógeno (H_2). Esta representación gráfica permite visualizar de forma clara qué combinaciones de biomasa resultaron más eficaces en la generación de este gas, el cual desempeña un papel importante como subproducto energético en el proceso de digestión anaeróbica. La Figura 7 facilita la interpretación de los resultados al evidenciar la influencia de cada sustrato en el rendimiento de hidrógeno durante las seis semanas de medición

Figura 7. Proporción para la obtención de H₂.

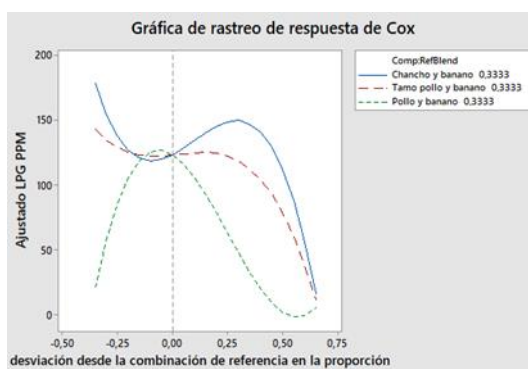


Fuente: Minitab 19

Según una investigación de la Universidad Técnica de Machala que evaluó la codigestión anaerobia de cáscara de banano con estiércol porcino, se concluyó que los biorreactores que contenían una mayor proporción de estiércol porcino presentaron el mejor rendimiento de biogás, alcanzando hasta 3 235 mL en mezclas específicas (Masache Bravo & Jiménez Romero, 2024). El estudio indica que el estiércol porcino, por su elevado contenido de materia húmeda, es más eficiente para generar biogás, mientras que la inclusión de biomasa vegetal como cáscara de banano ayuda a equilibrar la relación C/N, favoreciendo así la producción de metano. Estos dos insumos corresponden a componentes de “primera generación” para la generación de biogás, debido a su disponibilidad y alta eficiencia energética.

La siguiente figura muestra la distribución proporcional de los componentes utilizados en los diferentes biodigestores en relación con la producción de gas licuado de petróleo (LPG). Este gas, compuesto principalmente por propano y butano, es uno de los subproductos energéticos clave en la digestión anaeróbica. La **Figura 8** permite identificar qué combinaciones de biomasa resultaron más eficientes en la generación de LPG, aportando datos relevantes para evaluar el potencial energético de cada mezcla estudiada.

Figura 8. Proporción para la obtención de LPG.



Se evidencia que el biorreactor que contiene estiércol porcino y cascara de banano obtuvo mejor rendimiento de LPG un componente del biogás, según la investigación de (Corma, Iborra, Climent, & Sulay, 2014). El 5-hidroximetilfurfural (HMF) es un compuesto que se origina a partir de la deshidratación de azúcares como hexosas y pentosas, presentes en residuos lignocelulósicos —como las cáscaras de banano— cuando se someten a condiciones

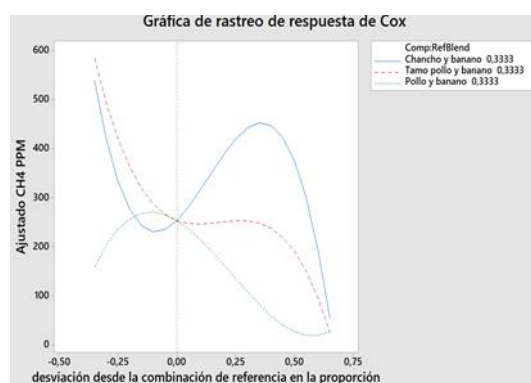
ácidas. Este compuesto también puede generarse mediante procesos industriales como el Biofine. Tanto el HMF como otros derivados, como el biobutano, se obtienen a través de la conversión de estos azúcares durante el pretratamiento hidrolítico de materiales celulósicos, etapa que forma parte del proceso de fermentación utilizado para producir bioetanol o biobutanol (Menegazzo et al., 2018).

La siguiente figura representa la proporción de los componentes utilizados en los biodigestores en relación con la producción de metano (CH_4), principal componente energético del biogás. La generación de metano es un indicador clave de la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, ya que refleja la actividad metabólica de las bacterias metanogénicas sobre los sustratos orgánicos. La Figura 9 permite visualizar qué combinación de biomasa resultó más efectiva para maximizar la producción de este gas, proporcionando información fundamental para optimizar futuras formulaciones en la generación de biogás.

Se evidencia que el biorreactor que contiene estiércol porcino y cascara de banano obtuvo mejor rendimiento de LPG un componente del biogás, según la investigación de (Corma, Iborra, Climent, & Sulay, 2014). El 5-hidroximetilfurfural (HMF) es un compuesto que se origina a partir de la deshidratación de azúcares como hexosas y pentosas, presentes en residuos lignocelulósicos —como las cáscaras de banano— cuando se someten a condiciones ácidas. Este compuesto también puede generarse mediante procesos industriales como el Biofine. Tanto el HMF como otros derivados, como el biobutano, se obtienen a través de la conversión de estos azúcares durante el pretratamiento hidrolítico de materiales celulósicos, etapa que forma parte del proceso de fermentación utilizado para producir bioetanol o biobutanol (Menegazzo et al., 2018).

La siguiente figura representa la proporción de los componentes utilizados en los biodigestores en relación con la producción de metano (CH_4), principal componente energético del biogás. La generación de metano es un indicador clave de la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, ya que refleja la actividad metabólica de las bacterias metanogénicas sobre los sustratos orgánicos. La Figura 9 permite visualizar qué combinación de biomasa resultó más efectiva para maximizar la producción de este gas, proporcionando información fundamental para optimizar futuras formulaciones en la generación de biogás.

Figura 9. Proporción para la obtención de CH_4

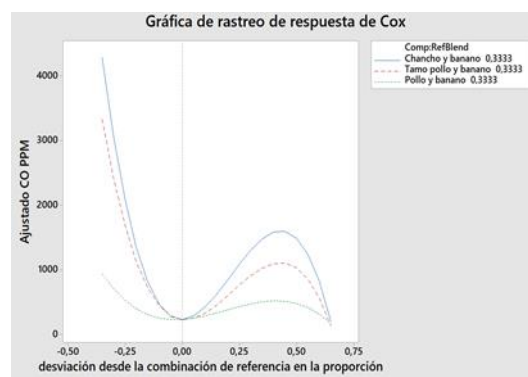


Se evidencia que el biorreactor de estiércol de porcino y cascara de banano obtuvo mejor rendimiento, según la investigación de [3] (Corma, Iborra, Climent, & Sulay, 2014). Se demostró que el residuo de banano tiene mayor potencial como materia prima para la producción de metano. Se realizó un análisis por PCR-DGGE con oligonucleótidos específicos,

se pudo medir la composición y el tamaño de las poblaciones de arqueobacterias y eubacterias. presentes en la digestión anaerobia de residuos agroindustriales a lo largo del proceso (González, Pérez, Wong, Bello, & Yañez, 2015).

La siguiente figura muestra la proporción de los sustratos utilizados en los biodigestores en relación con la generación de monóxido de carbono (CO) durante el proceso de digestión anaeróbica. Aunque el CO no es un componente deseado en grandes cantidades dentro del biogás debido a sus efectos tóxicos, su presencia es común en ciertas etapas del proceso y puede ofrecer información sobre las condiciones de descomposición y la eficiencia del sistema. La Figura 10 permite identificar qué combinaciones de biomasa favorecieron en mayor medida la producción de este gas, aportando datos útiles para evaluar la calidad del biogás generado y la necesidad de procesos de purificación.

Figura 10. Proporción para la obtención de CO

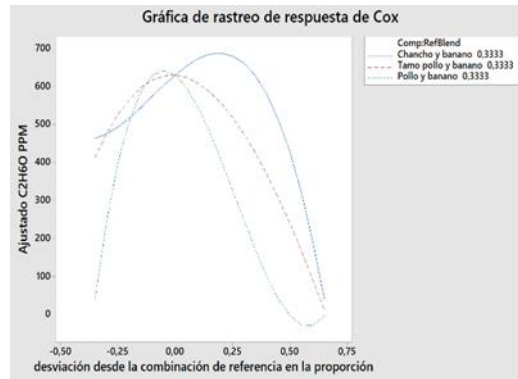


Fuente: Minitab 19

De acuerdo con investigaciones recientes, en los biorreactores que utilizan una mezcla de estiércol porcino y residuos vegetales como la cáscara de banano, se ha observado una producción notable de monóxido de carbono (CO), junto con niveles significativos de dióxido de carbono (CO₂) en el biogás. La presencia de CO ha sido documentada como un componente usual en diversas biomásas tratadas mediante digestión anaeróbica, lo que sugiere la importancia de sistemas de purificación del biogás diseñados para eliminar este gas indeseado y así enriquecer la calidad del metano obtenido (Koch et al., 2021; Lai et al., 2022).

La siguiente figura presenta la proporción de los sustratos utilizados en los biodigestores en relación con la producción de etanol (C₂H₆O), un compuesto derivado de la fermentación de biomasa vegetal rica en celulosa y hemicelulosa. El etanol es un biocombustible de interés por su capacidad energética y su potencial como sustituto de combustibles fósiles líquidos. La Figura 11 permite visualizar qué mezclas de biomasa favorecieron una mayor producción de este compuesto, aportando información valiosa sobre la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica en la obtención de subproductos aprovechables.

Figura 11. Proporción para la obtención de C₂H₆O.

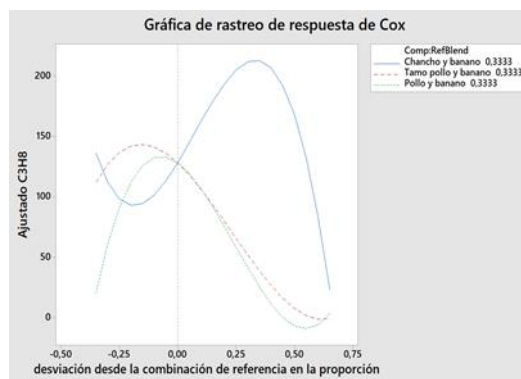


Fuente: Minitab 19

Se evidencia que el biorreactor que contiene estiércol porcino y cáscara de banano obtuvo un mejor rendimiento. Según investigaciones, los tres principales componentes de la biomasa vegetal –celulosa, hemicelulosa y lignina– tienen aplicaciones destacadas en la producción de biocombustibles. La celulosa y la hemicelulosa se utilizan para la obtención de etanol mediante procesos de hidrólisis y fermentación, mientras que la lignina puede aprovecharse como fuente de energía térmica, en la fabricación de adhesivos, o incluso como coadyuvante en aplicaciones biomédicas. Estos materiales representan la base de los biocombustibles de primera generación, al provenir directamente de biomasa vegetal como la caña de azúcar o el maíz (Sun & Cheng, 2002).

La figura a continuación muestra la proporción de los componentes utilizados en los biodigestores en relación con la producción de propano (C_3H_8), un gas que, aunque se presenta en menor cantidad dentro del biogás, forma parte de los compuestos combustibles que contribuyen a su valor energético. El análisis de la Figura 12 permite identificar qué combinaciones de sustratos favorecieron una mayor generación de propano, proporcionando una visión complementaria sobre la calidad del biogás producido y su potencial como fuente de energía alternativa.

Figura 12. Proporción para la obtención de C_3H_8



Fuente: Minitab 19

Según estudios sobre la composición del biogás, además del metano y el dióxido de carbono, el biogás crudo puede contener pequeñas cantidades de etano, propano, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno (OEHHA, 2020). Estos gases traza, como el propano, son relevantes porque, aunque no contribuyen significativamente al poder calorífico, sí

requieren ser removidos si se desea enriquecer el biogás para aplicaciones de alta calidad o estándares de inyección en redes de gas.

4. CONCLUSIONES

Este estudio evidenció que la co-digestión de estiércol porcino con cáscara de banano constituye la combinación más eficaz para la generación de biogás, en contraste con otras combinaciones evaluadas. Este hallazgo es atribuible a la proporción equilibrada de carbono y nitrógeno (C/N) y a la elevada concentración de materia orgánica fácilmente degradable en dichos sustratos, factores que propiciaron la actividad de las bacterias metanogénicas y la producción de gases como metano, hidrógeno y propano.

La mezcla utilizada en el biodigestor registró los valores más elevados de metano (518,000 ppm), monóxido de carbono (2072,417 ppm), LPG (196,767 ppm), etano (739,092 ppm) y propano (172,383 ppm), lo que evidencia un rendimiento energético superior en comparación con los biodigestores que incorporaban estiércol avícola o gallinaza con cáscara de banano.

Adicionalmente, el análisis fisicoquímico de los gases corrobora que la biomasa lignocelulósica contenida en la cáscara de banano contribuye a la producción de subproductos valiosos como el HMF, el etanol y el biobutano, lo cual reafirma su factibilidad como fuente renovable. Este descubrimiento guarda consistencia con estudios anteriores (Sun & Cheng, 2002; Menegazzo et al., 2018).

Además, se subraya que las combinaciones con gallinaza o estiércol avícola, pese a su viabilidad, exhibieron un rendimiento inferior debido a su elevado contenido de nitrógeno y humedad, factores que pueden provocar inhibiciones en el proceso de digestión anaeróbica (Koch et al., 2021).

En última instancia, este estudio reafirma el potencial del biogás como una opción limpia y sostenible en comparación con los combustibles fósiles, fomentando la economía circular a través de la utilización de desechos orgánicos derivados de la actividad agropecuaria. La adopción de biodigestores con sustratos como el estiércol porcino y la cáscara de banano constituye una estrategia eficaz para la minimización de desechos, la atenuación de las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de energía renovable a escala local.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCavícola. (2024, febrero 28). Desafíos y oportunidades: El impacto ambiental de la industria avícola y estrategias de mitigación. <https://www.abcavicola.com/post/desaf%C3%ADos-y-oportunidades-el-impacto-ambiental-de-la-industria-av%C3%ADcola-y-estrategias-de-mitigaci%C3%B3n>

ACS Publications. (2023). Effect of ammonia inhibition in anaerobic digestion. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.3c07840>

Aghogho, O. O., & Osubor, C. C. (2024). Effect of hydraulic retention time and substrate-to-inoculum ratio on batch anaerobic digestion of goat manure and response surface methodology. *European Journal of Sustainable Development Research*, 8(1), em0246. <https://www.researchgate.net/publication/391452591>



Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, 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>

Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S. (2018). Diseño conceptual de un biodigestor a partir de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca El Guarumal, para la obtención de biogás (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6844>

Blumberga, D., Veidenbergs, I., Romagnoli, F., Rochas, C., & Žandeckis, A. (2011). Bioenergy technologies. Riga: RTU. <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/11177>

Corma, A., Iborra, S., Climent, M., & Sulay, K. (2014, julio). Procedimiento de obtención de moléculas orgánicas útiles como nuevos agentes surfactantes. DSpace. <http://hdl.handle.net/10261/123091>

Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito. (2020, enero 10). Plan estratégico Emaseo EP 2020-2023. https://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/2020/Plan_Estrategico_EMASEO_EP_2020-2023.pdf

EPCM Holdings. (2024, junio 18). The basis of anaerobic digestion process. <https://epcmholdings.com/the-basis-of-anaerobic-digestion-process/>

González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>

Jardinería Ideal. (2025, marzo). Gallinaza: transformación de residuos en abono de calidad. Jardinería Ideal. <https://jardineriaideal.com/gallinaza-transformacion-de-residuos-en-abono-de-calidad/>

Koch, L., Han, X., & Wang, Y. (2021). Challenges in anaerobic digestion and biogas production: Variability and microbial activity. *Renewable Energy*, 168, 1234-1242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.076>

Lai, R., Zheng, Z., Tan, G., & Chen, Z. (2022). Production of carbon monoxide during anaerobic digestion in co-digestion systems. *Bioresource Technology*, 357, 127430. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127430>

Lauka, D., Slišāne, D., Ieviņa, L., Muižniece, I., & Blumberga, D. (2019). When bioeconomy development becomes a biomass energy competitor. *Environmental and Climate Technologies*, 23(3), 347-359. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0100>

Llanos, O. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación ambiental. *Producción + limpia*, 11(2), 153-156. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>

Machado, J. (2020, febrero 20). Conozca la ruta de las 2.200 toneladas diarias de basura producidas en Quito. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/conozca-ruta-basura-quito/>

Martínez, A., González, J., & García, M. (2020). Impact of lignin degradation on biogas production from agricultural residues. *Bioresource Technology*, 302, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122132>

Martínez-Cardozo, C., Cayón-Salinas, G., & Ligarreto-Moreno, G. (2016). Composición química y distribución de materia seca del fruto en genotipos de plátano y banano. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 217-227. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:491



Masache Bravo, J. O. J. R. (2024). Aprovechamiento de la cáscara de banano para la obtención de biogás: una alternativa energéticamente sostenible para el ambiente [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Digital UTMACH. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/23537>

Menegazzo, F., Ghedini, E., & Signoretto, M. (2018). 5 Hydroxymethylfurfural (HMF) Production from Real Biomasses. *Molecules*, 23(9), 2201. <https://doi.org/10.3390/molecules23092201>

Meyer, A. K. P., Ehimen, E. A., & Holm-Nielsen, J. B. (2018). Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.013>

Ministerio del Ambiente y Agua. (2020a, 2020b). Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales (1.ª ed.). Quito, Ecuador: Asociación de Municipalidades del Ecuador y Fundación ACRA. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/07/MANUAL-DE-APROVECHAMIENTO-DE-RESIDUOS-ORGANICOS-MUNICIPAL.pdf>

Montesdeoca, G., & Salázar, A. (2020). Evaluación de relaciones entre gallinaza y agua en la producción de biogás en la granja avícola "Zambrano Ponce" del cantón Chone, ESPAM, Calceta, Manabí, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.esпам.edu.ec/handle/42000/601>

Moreno Ayala, L., & Cadillo Castro, J. (2018). Uso del estiércol porcino sólido como abono orgánico en el cultivo del maíz chala. *Anales Científicos*, 79(2), 415-419. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.914>

Nieto, G., & González, R. (2018). Composición y uso de gallinaza en explotaciones avícolas. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, 33(1), 54-60.

OEHHA. (2020). AB 1900 Biogas Recommendations: Biogas constituents of concern and biomethane quality standards. Office of Environmental Health Hazard Assessment. <https://oehha.ca.gov/sites/default/files/media/downloads/air/report-document-background/biomethane010320.pdf>

Oliva, C., Y., Lopetry, M., González, S., E., & Pedraza, G., J. (2004). Posibilidades técnico-económicas de producir bioetanol de caña considerando el uso de residuos lignocelulósicos. Congreso Internacional de los Derivados de la Caña de Azúcar. Diversificación 2004, Ciudad Habana, junio, 2004. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223123848002.pdf>

Ramírez, J. C., Parra, M. Y., Zárate Chaves, Á. M., & Moreno Bernal, C. A. (2010). Ingeniería básica para el proceso de generación de biogás, a partir de porquinaza. *Publicaciones e Investigación*, 4(1), 93-110. <https://doi.org/10.22490/25394088.580>

Ramírez, T., Medrado, O., & Escobedo-Cazán, L. (2020). Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El caso de la PTAR zona noroeste, Villahermosa, México. *enerLAC: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(1), 12-30. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8410/1/T3670-MCCSD-Espinosa-Biogas.pdf>

Retto, P. (2019). Potencial energético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales lignocelulósicos en el Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. Universidad Nacional de Trujillo Repositorio Institucional. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12153>

Springer. (2025). Anaerobic digestion: The impact of the C/N ratio on biogas production. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-025-10820-4>



Tobar, M., & Egas, V. (2002). Sector avícola. Superintendencia de Bancos y Seguros del Ecuador, Dirección Nacional de Estudios y Estadísticas, Dirección de investigaciones. Consultado el 24 de junio de 2016, de <https://www.superban.gov.ec>

Van Der Zee, A., Franco, G., & Nguyen, M. (2021). Odor control in biogas production systems: A review of methods and solutions. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5634-5642. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01993>

Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7)

Declaración de Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no presentan conflictos de intereses relacionados con este estudio y confirman que todos los procedimientos éticos establecidos por esta revista han sido rigurosamente respetados. Asimismo, garantizan que este trabajo es inédito y no ha sido publicado, ni parcial ni totalmente, en ninguna otra revista académica.