



Eficiencia del biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos sólidos fermentables

Efficiency of the biodigester at scale for the production of biogas and biofertilizer from fermentable solid waste

Eficiência do biodigestor à escala para a produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos fermentáveis

Hilda Fabiola Anguaya Isama ^I
pachistachislutea@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6142-4961>

Sindy Sisa Cerda Tanguila ^{II}
sindysisa@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1981-4894>

Correspondencia: pachistachislutea@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 15 agosto de 2025 * **Aceptado:** 28 de septiembre de 2025 * **Publicado:** 31 de octubre de 2025

- I. Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós, Ecuador.
- II. Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós, Ecuador.

Resumen

La producción de basura en instituciones de educación superior sin planes de manejo y aprovechamiento energético se ha convertido en un problema ambiental. En este sentido, en el Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós, se investigó la eficiencia de un biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos sólidos fermentables. Metodología empleada diseño experimental de series cronológicas con repetición de estímulo, enfoque cuantitativo y descriptivo. Se evaluaron tres sustratos diferentes para determinar el tratamiento más eficiente en la producción de biogás y biofertilizantes. El análisis estadístico inferencial se realizó con los programas Microsoft Excel e InfoStat. Los resultados revelaron 4.9 kg de generación per cápita. Los biodigestores prototipo mantuvieron parámetros ambientales óptimos durante las etapas de hidrólisis y metanogénesis. El tratamiento que combinaba residuos sólidos fermentables y estiércol vacuno en proporción (50:50) fue el más eficiente en la producción de biogás y biofertilizantes. A través del análisis de generación de residuos sólidos fermentables y eficiencia de producción anaeróbica, se seleccionó el modelo de biodigestor Batch modificado como el más adecuado en términos de viabilidad técnica, económica y ambiental.

Palabras clave: instituto; digestión anaerobia; biodigestor; biogás; biofertilizantes.

Abstract

Waste production at higher education institutions without management and energy recovery plans has become an environmental problem. In this regard, the efficiency of a scaled-down biodigester for biogas and biofertilizer production from fermentable solid waste was investigated at the Martha Bucaram de Roldós Higher Technological Institute. The methodology employed was a time-series experimental design with repeated stimulus, using a quantitative and descriptive approach. Three different substrates were evaluated to determine the most efficient treatment for biogas and biofertilizer production. Inferential statistical analysis was performed using Microsoft Excel and InfoStat software. The results revealed a per capita generation of 4.9 kg. The prototype biodigesters maintained optimal environmental parameters during the hydrolysis and methanogenesis stages. The treatment combining fermentable solid waste and cattle manure in a 50:50 ratio was the most efficient for biogas and biofertilizer production. Through the analysis of fermentable solid waste

generation and anaerobic production efficiency, the modified Batch biodigester model was selected as the most suitable in terms of technical, economic, and environmental viability.

Keywords: institute; anaerobic digestion; biodigester; biogas; biofertilizers.

Resumo

A produção de resíduos nas instituições de ensino superior, sem planos de gestão e valorização energética, tornou-se um problema ambiental. Neste contexto, investigou-se a eficiência de um biodigestor à escala reduzida para a produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos fermentáveis no Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós. A metodologia empregue foi um desenho experimental em série temporal com estímulos repetidos, utilizando uma abordagem quantitativa e descritiva. Foram avaliados três substratos diferentes para determinar o tratamento mais eficiente para a produção de biogás e biofertilizante. A análise estatística inferencial foi realizada com recurso aos softwares Microsoft Excel e InfoStat. Os resultados revelaram uma geração per capita de 4,9 kg. Os biodigestores protótipos mantiveram parâmetros ambientais ótimos durante as etapas de hidrólise e metanogénese. O tratamento que combinava resíduos sólidos fermentáveis e estrume de bovino na proporção de 50:50 foi o mais eficiente para a produção de biogás e biofertilizante. Através da análise da geração de resíduos sólidos fermentáveis e da eficiência da produção anaeróbia, o modelo de biodigestor em bateladas modificado foi selecionado como o mais adequado em termos de viabilidade técnica, económica e ambiental.

Palavras-chave: instituto; digestão anaeróbia; biodigestor; biogás; biofertilizantes.

Introducción

Según el reporte publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) entre el 8% y el 10% de las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se asocian al desperdicio de alimentos que no son consumidos a nivel mundial (ONU, 2021). La relevancia y abordaje actual sobre la necesidad ambiental de disminuir la emisión de los GEI derivados de la contaminación extensiva e incontrolada atribuida a la pérdida y desperdicio de alimentos, ha atraído el interés por la generación de fuentes de energía renovables provenientes de residuos orgánicos fermentables (Alves et al., 2020; Castillo et al., 2021; Granzotto et al., 2021; Singh et al., 2021).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura explica que alrededor del 14% de la producción alimentaria a nivel mundial se pierde en la industrialización, mientras que el 17% se desperdicia en la venta al por menor y especialmente en los hogares, convirtiéndose en la precursora de graves consecuencias medio ambientales, sociales y económicas; afectan a los 3.100 millones de personas que no tienen acceso a una dieta saludable y genera pérdidas de 400.000 millones de USD anuales (FAO, 2022). Singh et al. (2021) manifiestan que la generación residuos alimentarios es de 74 kg per cápita anual tanto en países de renta media como alta, es decir que, cada año un tercio de la comida producida a nivel mundial se pierde o desperdicia provocando que la cantidad de desechos orgánicos fermentables sea de aproximadamente 1.300 millones de toneladas.

Según Granzotto et al. (2021) los residuos alimentarios son producidos principalmente en hoteles, restaurantes, hogares, comedores estudiantiles y empresas, los cuales influyen significativamente la composición de la basura municipal de los países y por lo tanto exigen una política exitosa de gestión para cada ciudad o región. En el Ecuador, según el Instituto Nacional de Estadística y Censo, el servicio de recolección de residuos sólidos gestionado por los municipios (Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales) alcanza un 88,7% a nivel nacional, en 2020 representó un promedio de 12.613 toneladas diarias; cuyo 85,6% corresponde a basura no diferenciada y apenas el 14,4% a desperdicios diferenciados, a partir de las cuales se logró determinar que el 39,5% corresponden a residuos orgánicos. Cabe destacar que el 50,5% de los GADM cuentan con rellenos sanitarios, el 31,4% celdas emergentes y el 18,2% botaderos, donde la mayoría de los RSU son enterrados sin un adecuada separación o tratamiento (INEC, 2021).

Para García et al. (2019) los restaurantes, comedores o cafeterías escolares son considerados laboratorios idóneos para analizar y mejorar el patrón de consumo de alimentos. Adeniran et al. (2017) definieron a las universidades como “mini ciudades” debido a la extensión territorial y cantidad de personas que conforman las comunidades educativas, las cuales ocasionan efectos sobre el medio ambiente en mayor o menor medida, por ello, han adquirido interés por parte del público y audiencias científicas.

En el Ecuador se registran 113.745 alumnos distribuidos en 286 institutos técnicos y tecnológicos, quienes generan en promedio 0,86 Kg de basura diaria por persona (Morán, 2020; SENESCYT, 2020). El Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós - (ISTMBR), no cuenta con planes o programas para el manejo y aprovechamiento energético a partir de los residuos

alimentarios que se generan en las instalaciones; atribuido a la falta de laboratorios para la experimentación y/o desarrollo de energías renovables. El ISTMBR se encuentra expuesto al riesgo de contaminación ambiental tomando en cuenta que las precipitaciones fluviales de la provincia Sucumbíos son significativas (25-27 días/mes), la humedad es alta (83% en promedio), al igual que la temperatura (26 °C-31°C), factores que aceleran la descomposición de la materia orgánica fermentable.

La evidencia empírica sobre la transformación y aprovechamiento de los restos de comida (residuos orgánicos fermentables) procedentes de instituciones educativas demuestra la atención que ha ganado debido al potencial térmico, eléctrico y fertilizante obtenido mediante la utilización de tecnologías como los biodigestores (Roldán et al., 2022). Como en el caso del estudio realizado por Wilkie et al. (2015) en tres escuelas de Estados Unidos donde se determinó que el 75% de los residuos de cafetería se podían recoger y reciclar mediante digestión anaeróbica para generar productos finales beneficiosos para el suelo y bioenergía. En el Tecnológico de Costa Rica se aprovechó el biogás producido a partir de residuos biodegradables procedentes del restaurante institucional (Ávila et al., 2018). Tafase et al. (2018) diseñaron un sistema de cogeneración de electricidad y calor a partir de residuos de cocina del campus de Kito Furdisa del Instituto Tecnológico de Jimma (India) permitiendo el uso de agua caliente y gas para estufas en la cafetería institucional.

En la misma línea, Vásquez (2020) analizó el potencial del biocombustible y biofertilizante producido por digestión anaerobia a partir de los residuos de comida de la cafetería en CETYS Universidad en México, hallando que el biogás se traduce como un ahorro respecto al consumo de gas licuado de petróleo (GLP) y el efluente sirve de nutrientes para las plantas y como regenerador del suelo. Mientras que Singh et al. (2021) utilizaron el estiércol de oveja (ES) y residuos de cocina (RG) provenientes de la Escuela de Biotecnología del Instituto Kalinga de Tecnología Industrial (India) como innovación para mejorar la producción de biogás, validando el potencial de biometanización de sustratos orgánicos. El estudio de Granzotto et al. (2021), desarrollado en la Universidad Federal de Santa María se convirtió en pionero del uso energético a partir de los residuos orgánicos en restaurantes universitarios de Brasil, además proporciona información importante para el diseño de una planta a mayor escala. Finalmente, Coca (2021) destacó al biodigestor como un recurso didáctico de aprendizaje en la Universidad Nacional “José Faustino

Sánchez Carrión” mediante el uso de los desechos orgánicos del campus en la obtención de biogás y bioabonos (biol y biosol).

En ese contexto es importante llevar a cabo la presente investigación para observar de manera amplia y precisa la situación sobre la producción de desechos alimentarios (residuos sólidos fermentables) en el ISTMBR para determinar las mejores acciones de manejo y aprovechamiento bajo la aplicación del biodigestor como una tecnología sostenible que permita el mejoramiento de las condiciones higiénicas, sociales, económicas y medioambientales del campus (Achinas & Euverink, 2019; Canales et al., 2021). Otro de los beneficios del proyecto es la construcción de un modelo a escala servirá como material didáctico de campo para fortalecer los conocimientos teóricos y prácticos en los estudiantes de la carrera de Medición y Monitoreo Ambiental sobre tecnologías sustentables que minimizan la contaminación de los recursos naturales y permiten la producción energías renovables, ya que, según (Roldán et al., 2022). en la actualidad los biodigestores son económicos, de fácil instalación y mantenimiento accesible.

El estudio se plantea con la finalidad de agregar valor a los residuos fermentables que se generan en el ISTMBR mediante el uso de una tecnología ecológica a construirse a partir del análisis experimental del proceso de digestión anaerobia más eficiente para la producción energía renovable (biogás) y abono (biofertilizante) a ser utilizados para las actividades agrícolas y reemplazo de gas doméstico en la institución.

Por lo mencionado, el objetivo general de la investigación es analizar la eficiencia de un biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos sólidos fermentables en el Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós, Sucumbíos, Ecuador. Para lo cual, los objetivos específicos u operativos son: Determinar la generación per cápita de residuos sólidos fermentables del ISTMBR. Evaluar los parámetros ambientales in situ del proceso de biodigestión en prototipos de biodigestor utilizando dosificaciones diferentes de residuos fermentables. Cuantificar la eficiencia de la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos fermentables en los prototipos de biodigestor. Dimensionar un biodigestor a escala adaptado a las condiciones del Instituto como un sistema de manejo y aprovechamiento de residuos fermentables.

Metodología

El proceso metodológico se efectuó bajo el método científico de acuerdo con la ruta cuantitativa de la investigación de los autores Hernández-Sampieri & Mendoza-Torres (2018), del cual se

desprendieron una serie de actividades sistematizadas, es decir, alineadas de manera ordenada y lógica a los objetivos del presente estudio, a fin de incrementar el conocimiento acerca de los beneficios sobre el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos fermentables mediante digestores anaerobios, aplicando el rigor racional, técnicas válidas y pruebas estadísticas.

Diseño de la investigación

La investigación de acuerdo con el grado de control sobre las variables corresponde a un estudio experimental donde se evaluó el potencial de aprovechamiento de los residuos sólidos fermentables (RSF) generados en el ISTMBR a través de la tecnología biodigestor. Se ejecutó un experimento donde se evaluaron tres tratamientos en las mismas condiciones ambientales para medir el comportamiento de la variable dependiente (eficiencia del biodigestor) en diferentes proporciones de biomasa: RSF + estiércol vacuno, 100:0, 50:50 y 75:25, respectivamente, mientras se controló la variable independiente (factores ambientales del biodigestor) que teóricamente condicionan la producción y calidad de los productos de la digestión anaerobia.

Según el origen de los datos en el tiempo se definió el corte como un diseño experimental de series cronológicas con repetición de estímulo, que tomó lugar en la fase de trabajo de campo, permitiendo analizar los efectos no inmediatos que suponen los parámetros ambientales sobre la producción de biogás y biofertilizante en el proceso de digestión anaerobia de un digestor, aplicando la repetición del tratamiento experimental en dos ocasiones.

Tabla 1 *Diseño experimental de series cronológicas múltiples*

RG1	X1	O1	X1	O4
RG2	X2	O2	X2	O5
RG3	X3	O3	X3	O6

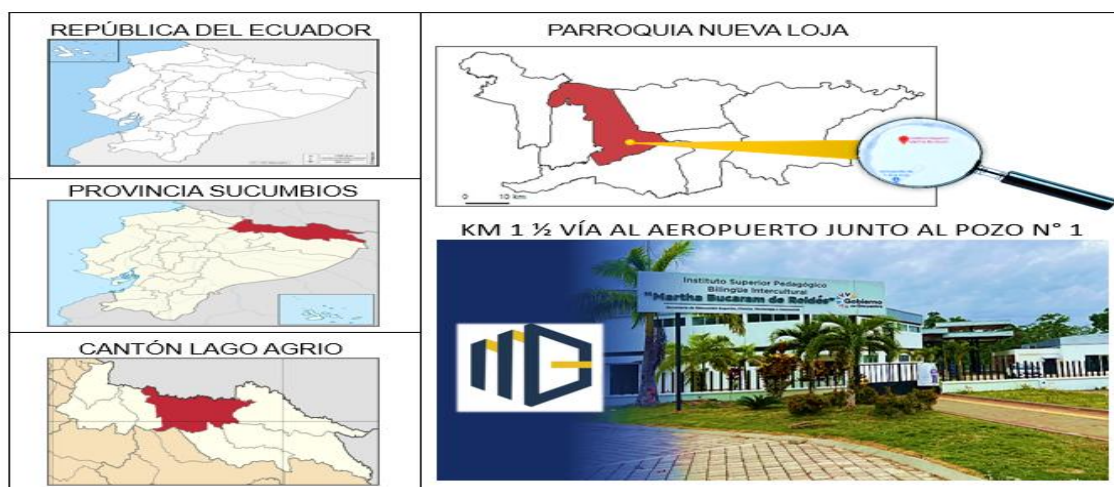
*Nota: *R = Asignación al azar, *G = Grupo de sujetos (residuos fermentables del ISPIBMBR), *X = Tratamiento o estímulo en la variable independiente (dosificaciones del sustrato), *O = Medición de la variable dependiente.*

Se utilizó el enfoque cuantitativo por medio de la estadística inferencial para representar una solución óptima al problema de manejo y aprovechamiento de residuos sólidos fermentables generados en el Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós (ISTMBR), mediante el diseño de un biodigestor a escala para producción de biogás y biofertilizantes. Por lo antedicho, el alcance del conocimiento de la presente investigación es descriptivo.

Población y muestra

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una delimitación espacial y temporal. El Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós está ubicado en las coordenadas latitud $0^{\circ}06'24.5''N$ y longitud $76^{\circ}51'54.1''W$, a una altitud de 297 metros sobre el nivel del mar, en la parroquia Nueva Loja, perteneciente al cantón Lago Agrio, provincia Sucumbíos, país Ecuador. El estudio se ejecutó en el período comprendido entre septiembre de 2022 y julio de 2023.

Figura 1 Ubicación geográfica de la investigación



Nota. Instalaciones del ISTMBR campus Nueva Loja.

Para el análisis de la composición y eficiencia de los residuos sólidos fermentables en la producción de biogás y biofertilizantes, se consideró como población todos los residuos sólidos urbanos (RSU) generados por las 691 personas que conforman la comunidad educativa, recolectados en el campus del ISTMBR durante 10 días laborales (grupos sujetos de estudio).

Mientras que, para la definición del tamaño de la muestra se utilizó el muestreo sistemático a través del método de cuarteo para residuos sólidos propuesto por Klee & Carruth (1970), donde una vez iniciado el proceso de recolección (grupos) todos los residuos que cumplieron con la característica de ser fermentables tuvieron la misma probabilidad de participar en el experimento, es decir, las muestras participantes fueron seleccionadas al azar de manera representativa (Ver procedimientos).

Variables

Para analizar la eficiencia de un biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizantes a partir de residuos sólidos fermentables en el Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de

Roldós, se partió de la revisión de la literatura, la cual permitió sistematizar metodológicamente el problema de investigación mediante una matriz de consistencia, una vez precisadas las definiciones operacionales y el tipo de datos a recolectar, se procedió con la construcción de la operacionalización de variables.

Tabla 2 Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Medida
Dependiente (y): Eficiencia del biodigestor	Producción del biodigestor	Cantidad de biogás (B1)	m ³
		Cantidad de biol (B2)	L
		Cantidad de biosol (B3)	Kg
Independiente (x): Factores ambientales del biodigestor	Condicionantes	Temperatura (Temp)	°C
	físicos de la	Potencial de hidrógeno (pH)	Grado de acidez
	digestión	Tiempo de retención (TRh)	Días
	anaeróbica	Razón biomasa agua (B:A)	Kg/L

Instrumentos de medición y técnicas

Se determinaron las fuentes de información de origen primario y secundario necesarias para el desarrollo de la investigación cuantitativa, mismas que permitieron la recolección y presentación de la información basada en la medición de variables a fin de comparar los resultados e interpretarlos de manera estadística en función de la literatura científica, por lo tanto, las técnicas utilizadas fueron la investigación documental y la observación cuantitativa.

La investigación documental permitió la recolección y análisis de la información secundaria, el procedimiento consistió en la revisión de los instrumentos de medición utilizados por otros autores, facilitando la construcción de la matriz de operacionalización y los formularios para el registro de datos, así como la definición de los materiales y herramientas necesarias para el levantamiento de datos.

Tabla 3 Parámetros de la investigación documental

Fuente documental	Scopus, Google Académico, Alicia, Dialnet, Redalyc, Scielo, INEC.
Tipo de publicación	Artículos científicos, revistas científicas, libros, tesis de pregrado, maestría y doctorales.
Intervalo de tiempo	Se filtró por T-5, es decir, 5 años atrás del año actual (2018-2023). Sin embargo, debido a la relevancia del contenido se seleccionó documentos desde 2015.

Palabras clave	Biodigestor, universidades, institutos, residuos sólidos orgánicos, residuos fermentables, biogás, biofertilizante, biol, biosol.
Idioma	Sin restricción (español, inglés, portugués)

Nota. En la tabla se resume las estrategias de búsqueda y bases de datos utilizadas para la revisión sistemática de la literatura especializada en el tema.

La observación cuantitativa consistió en un procedimiento sistémico para la recolección la información primaria, misma que tuvo lugar en el trabajo de campo donde se utilizaron aparatos de cálculo y métodos de medición confiables para la toma de datos que finalmente fueron registrados de manera estructurada e inequívoca en bitácoras y formularios orientados a la descripción, predicción y explicación del fenómeno de estudio mediante el análisis estadístico.

Tabla 4 *Aparatos de cálculo cuantitativos*

Instrumento	Características	Finalidad	Materiales adicionales
Balanza mecánica tipo reloj	Marca Camry SP-60 de 60 Kg de capacidad con precisión de 200 gr.	Determinar la cantidad de residuos recolectados en el campus. Realizar el pesaje de los biofertilizantes obtenidos.	Fundas de basura tamaño 23"x28". Plancha de impermeable. Guantes Pala Marcadores. Cinta masking. Tablas de registro.
pHmetro multiparámetro	Marca MG 4 en 1 digital.	Levantamiento de datos y control de los indicadores de la variable independiente en rangos temperatura de -9 a 50°C y pH 3.5~9.0.	Prototipos de biodigestor. Sustratos en diferente concentración de biomasa. Tablas de registro.
Probeta de vidrio	Graduada con base redonda de 500ml de capacidad.	Aplicar el método de desplazamiento de agua para la medición del biogás.	Recipiente plástico rectangular de 4L. Agua. Tablas de registro.

Se utilizaron como instrumentos de medición de datos cuantitativos las pruebas estandarizadas propuestas por varios autores: Sandoval (2015) para el cálculo de la generación de residuos per cápita en el ISPMBR-BI, Díaz et al., (2022) y Granzotto et al. (2021) para la medición de la producción de biogás, León et al. (2019) para el cálculo de la cantidad de biofertilizantes (biol y biosol) y los pasos para la construcción del biodigestor a escala, y Apolo Valarezo (2019) para el

dimensionamiento del biodigestor a escala (ver procedimientos). Toda la información recopilada durante la ejecución del experimento se almacenó de manera física en los instrumentos; bitácora y tablas de registro, diseñadas en función a las variables de estudio, con la finalidad de facilitar la representación y comparación de cambios en los indicadores.

Procedimientos

El procedimiento utilizado en la investigación constituye una herramienta guía para ser utilizada por los interesados en el aprovechamiento de residuos sólidos fermentables para la producción de biogás o biofertilizantes, en el cual se aborda de maneral integral el sistema y diseño de un biodigestor anaerobio. El bosquejo del procedimiento se compone por 5 etapas y 11 pasos.

Tabla 5 *Procedimiento del estudio*

Etapa I: Observación del manejo de residuos sólidos en el ISTMBR.	Paso 1: Identificación de las áreas de disposición de residuos sólidos institucionales
	Paso 2: Recolección los residuos sólidos sin clasificar por áreas
	Paso 3: Clasificación y pesaje de residuos sólidos
Etapa II. Preparación del experimento.	Paso 4: Construcción de prototipos de biodigestor
	Paso 5: Toma de la muestra de residuos sólidos fermentables
	Paso 6: Preparación de sustratos para el experimento
Etapa III. Ejecución del experimento	Paso 7: Control de parámetros ambientales
	Paso 8: Medición de producción de biogás
	Paso 9: Medición de producción de biofertilizantes
Etapa IV. Procesamiento de datos	Paso 10: Creación y procesamiento estadístico de base de datos
Etapa V: Diseño de biodigestor a escala	Paso 11: Análisis de selección de tipo de biodigestor
	Paso 12: Dimensionamiento y proceso de construcción de biodigestor

Análisis estadístico

El análisis estadístico tuvo como objetivo determinar, con un nivel de confianza del 95%, si existieron diferencias significativas en la producción media de biogás y biofertilizantes entre los diferentes tratamientos, así como identificar cuál tratamiento fue el más eficiente en la producción de biogás y biofertilizantes en función en función de los diferentes tratamientos utilizados en cada prototipo de biodigestor.

Para ello, se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) unidireccional. Dado que ANOVA por sí solo no proporciona información específica sobre qué medias difieren entre sí, se aplicó el método de comparación de medias Tukey. Este método permitió identificar el mejor tratamiento al considerar

las diferencias significativas entre las medias de los tres tratamientos en las dos repeticiones, teniendo en cuenta los parámetros ambientales del sitio de estudio. El procesamiento de estas pruebas se realizó utilizando el programa estadístico InfoStat, con un nivel de significancia del 5%.

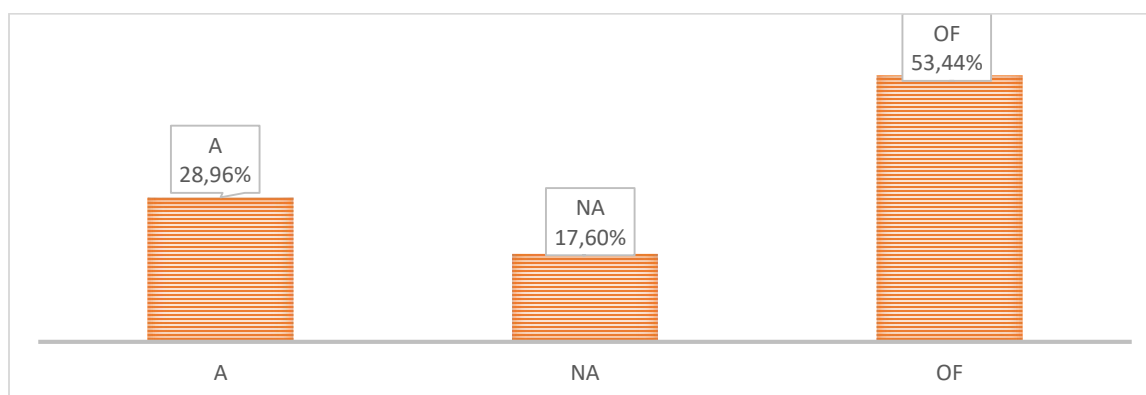
Resultados

Este capítulo ofrece una visión detallada de los resultados obtenidos en la investigación experimental, permitiendo una mejor comprensión de la capacidad de un biodigestor para convertir los residuos sólidos fermentables en recursos energéticos y fertilizantes naturales de calidad. El estudio proporciona información relevante sobre la viabilidad y eficiencia de esta tecnología en el contexto específico del ISTBMBR.

Generación per cápita de residuos sólidos fermentables del ISTBMBR

Para iniciar el estudio, se llevó a cabo una exhaustiva investigación para determinar la composición de los residuos sólidos generados en el ISTBMBR. Los hallazgos revelaron que el 53,48% de los residuos corresponde a materia orgánica o residuos sólidos fermentables (RSF), los cuales están compuestos por restos de alimentos cocidos, desperdicios sólidos de frutas, verduras, vegetales, remanentes cárnicos y residuos de jardines. Asimismo, se encontró que el 28,93% de los residuos son aprovechables, incluyendo papel, cartón, vidrio y plástico, mientras que el 17,59% restante corresponde a residuos sólidos no aprovechables. Estos últimos incluyen servilletas usadas, envolturas de alimentos, papel higiénico, sorbetes, aluminio y envases de poliestireno.

Figura 2 Composición RSU institucionales



Nota. Residuos sólidos urbanos generados en el ISTBMBR en diferentes áreas, clasificados en tres categorías: aprovechables (A), residuos no aprovechables (NA) y residuos orgánicos fermentables (OF).

Es importante resaltar que los RSF, que constituyen la fracción orgánica, son de particular importancia para la investigación, dado que se utilizan como ingrediente activo en el funcionamiento del biodigestor. Su aprovechamiento resulta esencial para la producción de biogás y biofertilizantes, los cuales se utilizan tanto en la cocción de alimentos como en la fertilización del suelo. Con base en esta caracterización inicial, se procedió a realizar el análisis de la producción per cápita de los RSF, como se muestra a continuación.

Tabla 6 Producción Per Cápita de Residuos Sólidos Fermentables

Instalaciones		Involucrados (p)	RSF (q)	PPC
Área 1	Oficinas administrativas	52	4,07	0,01
Área 2	Salones de clases	636	10,07	0,00
Área 3	Espacios de recreación	688	3,83	0,00
Área 4	Bar estudiantil	3	30,73	1,02
TOTAL		691	48,70	0,01

Nota. El cálculo del índice PPC se basó en la variable "q", que representa la generación total de RSF en kg, y en la variable "pt", que corresponde a la cantidad de personas que conforman la comunidad educativa durante un período de muestreo de 10 días.

En el campus del ISTMBR se produce un promedio de 0,01 kg de residuos sólidos fermentables (RSF) por persona. Esto implica una producción diaria de 4,9 kg de RSF, considerando la participación de los 691 miembros de la comunidad educativa. A partir de estos datos, se estima una producción semanal de 24,5 kg y mensual de aproximadamente 97,4 kg de RSF.

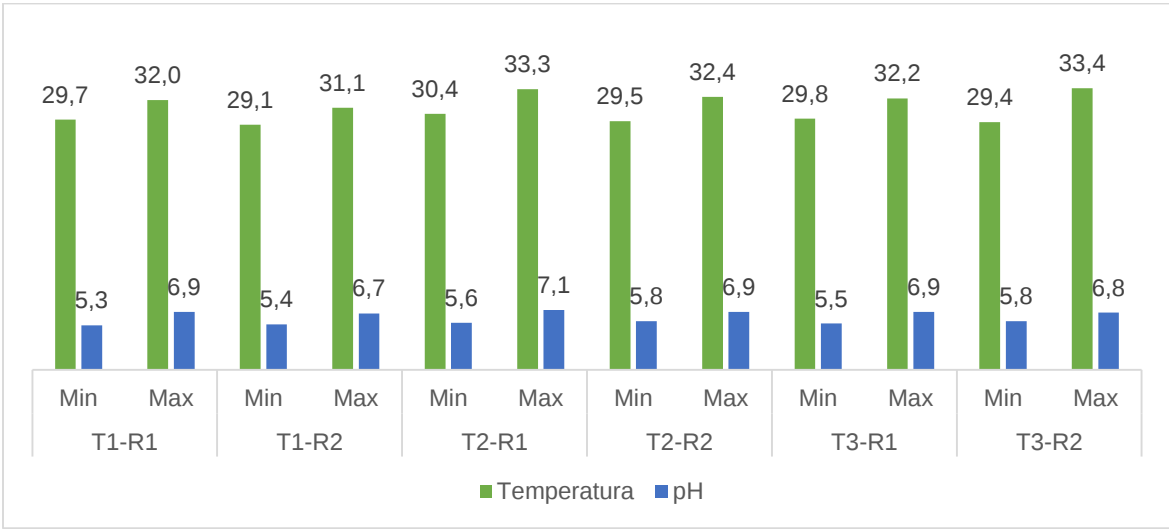
Se identificó que el bar estudiantil y los salones de clase son las áreas donde se genera una mayor cantidad de RSF en kilogramos. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias específicas en dichos espacios para reducir la generación de RSF y promover prácticas de separación, reciclaje y adecuado manejo de estos residuos. En particular, la valorización de los RSF a través de biodigestores anaerobios se destaca como una opción prometedora para obtener beneficios energéticos y ambientales, lo cual contribuye significativamente a la sostenibilidad y preservación del medio ambiente.

Evaluación de parámetros ambientales in situ del proceso de biodigestión en prototipos de biodigestor utilizando dosificaciones diferentes de residuos fermentables

El registro in situ de los parámetros ambientales durante un período de cuatro semanas por cada repetición, permitió identificar que la temperatura mínima en el interior de los biodigestores

prototipos fue de 29,1 °C, mientras que la temperatura máxima alcanzada fue de 33,4 °C, lo cual indica que se encuentra en un rango óptimo para la operación mesofílica. En cuanto al pH, los diferentes tratamientos mostraron un valor mínimo de 5,3 durante la etapa de hidrólisis y un valor máximo de 7,1 durante la fase de metanogénesis; valores adecuados para un desarrollo microbiano óptimo y una producción eficiente de biogás, ya que se encuentran dentro de los rangos de 5,5 a 6,5 y de 6,6 a 7,5, respectivamente.

Figura 3 Comportamiento de los parámetros temperatura y pH



Nota. Se representa la temperatura y pH mínimos y máximos para cada tratamiento en las dos repeticiones durante el experimento.

Además, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias significativas en las medias de los diferentes tratamientos en relación con los parámetros ambientales. Además, se aplicó la prueba post hoc de Tukey para definir el tratamiento que ofreció las mejores condiciones ambientales para el proceso de digestión anaeróbica.

Tabla 7 Análisis de varianza y comparación de medias de la variable temperatura

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Temperatura	6	0,91	0,76	1,14
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
GL	SC	MC	F	p-valor
2	1,42	0,71	5,69	0,1494
Comparación de medias para los tratamientos				

Test	Alfa	DMS	Error	GL
Tukey	0,5	2,0827	0,125	2
Tratamiento	Medias	n	E.E.	L
T2	31,70	2	0,25	A
T3	30,85	2	0,25	A
T1	30,55	2	0,25	A

*Nota. Hipótesis nula = No existen diferencias en la temperatura entre los diferentes tratamientos. Hipótesis alterna = La temperatura al interior de biodigestor varía de acuerdo con el tratamiento. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)*

En la Tabla 7 se presenta el análisis de varianza y la comparación de medias para la variable temperatura. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,91$) y el coeficiente de variabilidad ($CV = 1,14$) indican una buena capacidad del modelo para explicar el comportamiento de los valores de temperatura en el experimento.

En relación con la hipótesis nula, que planteaba que no existían diferencias en la temperatura entre los diferentes tratamientos, el valor p obtenido (0,1494) es mayor al nivel de significancia establecido de 0,05. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la temperatura no se ve afectada por el tipo de tratamiento dentro del biodigestor.

La comparación de medias utilizando la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% reveló que no existen diferencias estadísticamente significativas en las temperaturas medias entre los tratamientos. Sin embargo, se observa que el tratamiento 2 presenta una temperatura ligeramente superior, lo cual podría ser beneficioso para el proceso de digestión anaeróbica.

Tabla 8 Análisis de varianza y comparación de medias de la variable pH

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	6	0,95	0,88	0,63
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
GL	SC	MC	F	p-valor
2	0,06	0,03	19,00	0,0500
Comparación de medias para los tratamientos				
Test	Alfa	DMS	Error	GL
Tukey	0,5	0,24049	0,0017	2
Tratamiento	Medias	N	E.E.	L
T2	6,60	2	0,03	A

T3	6,50	2	0,03	A B
T1	6,35	2	0,03	B

*Nota. Hipótesis nula = No existen diferencias del potencial de hidrógeno entre los diferentes tratamientos. Hipótesis alterna = El pH al interior de biodigestor varía de acuerdo con el tratamiento. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).*

En la Tabla 8 se muestra el análisis de varianza y la comparación de medias para la variable pH. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,95$) y el coeficiente de variabilidad ($CV = 0,63$) indican una buena capacidad del modelo para comprender el comportamiento del pH en los diferentes tratamientos.

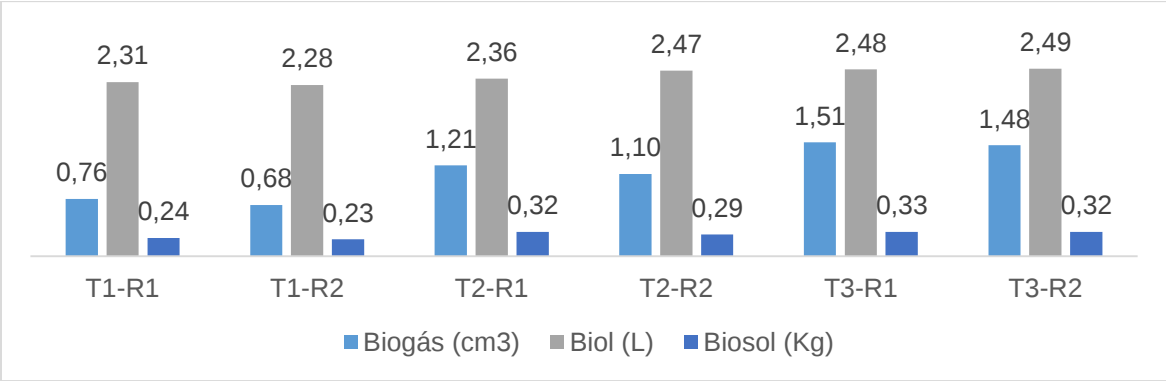
La hipótesis nula planteaba que no existían diferencias en el potencial de hidrógeno entre los diferentes tratamientos. Sin embargo, el valor p obtenido (0,05) fue igual al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$), lo que lleva a rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, se concluye que existen diferencias entre los grupos en relación con el pH, es decir, el pH se ve afectado por el nivel de concentración de biomasa (RSF: EV) en cada tratamiento.

La comparación de medias utilizando la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95% reveló que los tratamientos 1 y 2 no comparten una letra, lo cual indica que el tratamiento 2 tiene una media significativamente mayor que los tratamientos 1 y 3. Esto significa que, entre los tres tratamientos, el que presentaba una mayor concentración de RSF promovió un mejor desarrollo de las bacterias anaeróbicas.

Cuantificación de la eficiencia de la producción de biogás y biol a partir de residuos fermentables en los prototipos de biodigestor

Al observar el rendimiento del biogás generado en el biodigestor prototipo revela diferencias significativas entre los tratamientos, en la Figura 4 se muestra claramente que el tercer sustrato fue el más eficiente, logrando una producción máxima de 1,51 cm³, mientras que el tratamiento 1 fue el menos eficiente, generando un mínimo de 0,68 cm³. En cuanto al rendimiento del biofertilizante líquido (biol) no se observan diferencias significativas entre tratamientos, alcanzándose un máximo de 2,49 litros y un mínimo de 2,28 litros. En relación al biofertilizante sólido (biosol), los resultados también indican variaciones en su producción, misma que relaciona con la degradación de la materia orgánica durante 28 días, siendo el máximo de 0,32 kg y el mínimo de 0,23 kg.

Figura 4 Rendimiento de los tratamientos en el biodigestor prototipo



Estos hallazgos demuestran que el tipo de sustrato utilizado en el biodigestor tiene un impacto significativo en la generación de biogás, mientras que el rendimiento del biofertilizante líquido no varía de manera considerable entre los tratamientos. Además, la producción de biofertilizante sólido también se ve afectada por el sustrato utilizado y el tiempo de degradación de la materia orgánica. Para evaluar de manera más precisa estos resultados, se utilizó el software InfoStat versión estudiantil para llevar a cabo un análisis de varianza y una comparación de medias mediante el test post hoc de Tukey, con el fin de determinar el tratamiento más eficiente en términos de producción de biogás, biofertilizante líquido (biol) y biofertilizante sólido (biosol).

Tabla 9 Análisis de varianza y comparación de medias de la variable Biogás

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Biogás	6	1,00	0,99	2,54
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
GL	SC	MC	F	p-valor
2	0,60	0,30	369,57	0,0027
Comparación de medias para los tratamientos				
Test	Alfa	DMS	Error	GL
Tukey	0,5	0,16834	0,0008	2
Tratamiento	Medias	n	E.E.	L
T3	1,50	2	0,02	A
T2	1,16	2	0,02	B
T1	0,72	2	0,02	C

Nota. Hipótesis nula = No existen diferencias del rendimiento de biogás entre los diferentes tratamientos. Hipótesis alterna = Al menos un tratamiento presenta un rendimiento diferente de biogás. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El análisis de varianza ANOVA para la variable biogás arrojó un coeficiente de determinación perfecto ($R^2 = 1,00$) y el coeficiente de variabilidad de 2,54, lo cual indica que el modelo tiene una excelente capacidad para explicar el comportamiento de los tratamientos en relación con la producción de biogás.

En cuanto al p valor obtenido (0,0027), fue menor al nivel de significancia (0,05) lo que conllevó a rechazar la hipótesis nula y concluir que al menos un tratamiento muestra un rendimiento de biogás diferente. Al realizar la prueba de Tukey para comparar las medias de los tratamientos, se determinó que ninguno de ellos comparte la misma letra, dado que las medias obtenidas fueron de 1,50 cm³ para el tratamiento 1, 1,16 cm³ para el tratamiento 2 y 0,72 cm³ para el tratamiento 3. Estos resultados indican que el tratamiento 3 presenta una media de producción de biogás estadísticamente significativa y diferente a los tratamientos 1 y 2. Por lo tanto, se demuestra que el incremento de estiércol vacuno en el sustrato se asocia con una mayor eficiencia en la producción de biogás.

Tabla 10 Análisis de varianza y comparación de medias de la variable Biol

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Biol	6	0,88	0,7	2,13
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
GL	SC	MC	F	p-valor
2	0,04	0,02	7,10	0,1234
Comparación de medias para los tratamientos				
Test	Alfa	DMS	Error	GL
Tukey	0,5	0,30037	0,0026	2
Tratamiento	Medias	n	E.E.	L
T3	2,49	2	0,04	A
T2	2,42	2	0,04	A
T1	2,30	2	0,04	A

*Nota. Hipótesis nula = No existen diferencias del rendimiento de biol entre los diferentes tratamientos. Hipótesis alterna = Al menos un tratamiento presenta un rendimiento diferente de biol. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)*

El análisis de varianza ANOVA realizado para la variable de biofertilizante líquido (biol) arrojó un coeficiente de determinación de 0,88 y un coeficiente de variabilidad de 2,13, lo cual indica que el modelo utilizado tiene una buena capacidad para explicar el comportamiento de los tratamientos en relación con la producción de biol. El p valor obtenido (0,1234) resultó ser mayor al nivel de

significancia (0,05), por lo tanto, se aceptó la hipótesis nula, concluyendo que no hay evidencia suficiente para afirmar que existen diferencias en el rendimiento de biol entre los tratamientos. Sin embargo, al comparar las medias a través del test de Tukey se observa que el tratamiento 3 muestra un mejor rendimiento, con una producción de 2,49 litros de biofertilizante líquido, en comparación con los tratamientos 1 (2,42 litros) y 2 (2,30 litros).

Tabla 11 *Análisis de varianza y comparación de medias de la variable Biosol*

Variable	N	R²	R² Aj	CV
Biosol	6	0,99	0,96	2,83
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)				
GL	SC	MC	F	p-valor
2	0,01	0,0045	67,00	0,0147
Comparación de medias para los tratamientos				
Test	Alfa	DMS	Error	GL
Tukey	0,5	0,481	0,0001	2
Tratamiento	Medias	n	E.E.	L
T3	0,33	2	0,01	A
T2	0,31	2	0,01	A
T1	0,24	2	0,01	B

*Nota. Hipótesis nula = No existen diferencias del rendimiento de biosol entre los diferentes tratamientos. Hipótesis alterna = Al menos un tratamiento presenta un rendimiento diferente de biosol. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).*

El análisis de varianza ANOVA realizado para la variable de biofertilizante líquido (biol) reveló un alto coeficiente de determinación de 0,99 y un coeficiente de variabilidad de 2,83, lo que demuestra que el modelo utilizado tiene una capacidad sobresaliente para explicar el comportamiento de los tratamientos en relación con la producción de biofertilizante sólido (biosol). El p valor obtenido (0,0147) resultó ser menor al nivel de significancia (0,05), por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que al menos un tratamiento presenta un rendimiento diferente en cuanto a la producción de biosol. Finalmente, al realizar la comparación de las medias mediante el test de Tukey, se observó que las medias del tratamiento 3 y 2 no difieren de manera significativa ($T3 = 0,33$ kg y $T2 = 0,31$ kg), sin embargo, son estadísticamente diferentes a la media del tratamiento 1 (0,24 kg). Estos resultados indican que el tratamiento 3 ofrece un rendimiento superior en la producción de biosol en comparación con los tratamientos 1 y 2.

Los resultados obtenidos señalan claramente que el tratamiento 3, que combina RSF y estiércol vacuno en una proporción equilibrada (50:50), ofrece la mejor eficiencia en la producción de biogás y biofertilizantes (biol y biosol). Esta información es crucial para diseñar el biodigestor a escala, con el objetivo de aprovechar de manera óptima los residuos sólidos fermentables generados en el ISTMBR, además, son relevantes para la planificación de un sistema integral de manejo de residuos que incluya el aprovechamiento del estiércol de ganado vacuno proveniente de las fincas cercanas a la institución educativa.

Discusión

El análisis de la eficiencia de un biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos sólidos fermentables en el Instituto Superior Tecnológico Martha Bucaram de Roldós, Sucumbíos, Ecuador, arrojó los siguientes hallazgos.

Mediante una caracterización detallada, se determinó que el 53,48% de los residuos generados en un instituto corresponden a materia orgánica o residuos sólidos fermentables. Estos residuos son de gran importancia para el funcionamiento del biodigestor, ya que se utilizan como ingrediente activo en la producción de biogás y biofertilizantes. La producción promedio de residuos sólidos fermentables por persona se estimó en 0,01 kg, lo que equivale a una producción diaria de 4,9 kg considerando a toda la comunidad educativa.

Al contrastar estos hallazgos con investigaciones previas, se observó una diferencia significativa en la generación de residuos sólidos orgánicos. Según el estudio realizado por Vásquez (2020) en la Universidad CETYS de México, se estimó una producción diaria de 12,82 kg de residuos sólidos orgánicos, representando el 97,69% del total de residuos sólidos en el campus. Asimismo, en el estudio de Ávila et al. (2018) en el restaurante del Tecnológico de Costa Rica, se encontró un promedio de 229,16 kg de residuos sólidos biodegradables generados diariamente. Esta diferencia puede atribuirse a las diferentes poblaciones estudiantiles y características específicas de cada institución.

No obstante, los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los hallazgos de Wilkie et al. (2015), quienes revelaron que los residuos alimentarios representan entre el 47% y el 58% de la basura total en cafeterías de escuelas estadounidenses. Además, se encontró que la producción per cápita diaria de residuos alimentarios osciló entre 24,7 y 64,9 gramos por estudiante. Estos resultados respaldan la importancia de abordar la gestión de residuos alimentarios mediante la

implementación de medidas de reducción de desperdicios, educación y concientización de la comunidad educativa, así como el uso de métodos de reciclaje como el compostaje o la digestión anaeróbica.

En cuanto a los parámetros ambientales del proceso de biodigestión, se registraron la temperatura y el pH dentro de los biodigestores prototipos. Se encontró que la temperatura se mantuvo en un rango óptimo para la operación mesofílica, con valores mínimos de 29,1 °C y máximos de 33,4 °C. En cuanto al pH, se observó que los diferentes tratamientos mostraron valores adecuados para un desarrollo microbiano óptimo y una producción eficiente de biogás, con un pH mínimo de 5,3 en la etapa de hidrólisis y un máximo de 7,1 en la metanogénesis.

Al comparar estos hallazgos con investigaciones anteriores, se encontraron resultados consistentes. Por ejemplo, Alvarez (2020) evaluó la producción de biogás a partir de estiércol bovino y encontró que los valores de pH (rango 6,8-7,3) y temperatura (33 °C) fueron óptimos para lograr una producción máxima de 26,8 L de biogás por día. Este estudio respalda la viabilidad de implementar y fabricar biodigestores anaeróbicos de bajo costo.

Además, se encontró que la adición de hidróxido de sodio (NaOH) o el uso de un inóculo de estiércol de vaca junto con residuos de cocina a una temperatura mesofílica mejoró la producción de biogás, especialmente si los residuos eran ricos en almidón y azúcares, como menciona (Vikrant & Shekhar, 2013). Asimismo, Sanabria et al. (2018) afirmaron que el equilibrio en el pH y la temperatura dentro del rango mesofílico son indicadores de un excelente funcionamiento del biodigestor y promoverán un mejor rendimiento de biogás.

En cuanto a la temperatura, se encontró que en el régimen mesofílico se alcanzan menores tasas de degradación en comparación con el rango termofílico, como mencionan Ellacuriaga et al., (2021). Sin embargo, tanto en el régimen mesofílico como en el termofílico, se obtiene un rendimiento de biogás similar, siendo la desventaja del régimen mesofílico el mayor tiempo de retención necesario para la degradación total de los compuestos. Además, Khanh Nguyen et al. (2021) destacan que el digestato resultante en el régimen mesofílico presenta menos problemas de estabilidad en comparación con el régimen termofílico, lo que lo convierte en una opción ideal para aprovechar tanto el biogás como los fertilizantes.

Los hallazgos y las investigaciones previas resaltan la importancia de considerar los parámetros ambientales y las condiciones específicas al implementar sistemas de biodigestión anaeróbica para maximizar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos. Los resultados indican que

mantener la temperatura dentro de un rango óptimo, ya sea mesofílico o termofílico, junto con un pH adecuado, favorece la eficiencia y la producción de biogás.

La evaluación de la eficiencia de la producción de biogás y biofertilizante reveló que el tipo de sustrato utilizado en el biodigestor tiene un impacto significativo en la generación de biogás. El sustrato en concentración 50:50 mostró el rendimiento más eficiente, alcanzando una producción máxima de 1,51 cm³, mientras que el tratamiento con solo RSF fue el menos eficiente, generando un mínimo de 0,68 cm³. En cuanto al biofertilizante líquido, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, con una producción máxima de 2,49 litros y mínima de 2,28 litros. En relación al biofertilizante sólido, también se encontraron variaciones en su producción, relacionadas con la degradación de la materia orgánica, con un máximo de 0,32 kg y un mínimo de 0,23 kg.

Estos resultados guardan consistencia con los de Granzotto et al. (2021), quienes evaluaron la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y encontraron que el tiempo de retención y el pH también influyen en la eficiencia del proceso. También, Jimenez & García (2020), demostraron que la proporción de mezcla de estiércol porcino y cáscara de café afecta la producción de biogás, siendo la proporción de 60% estiércol porcino y 40% de cáscara de café la más eficiente. Además, se observó que el contenido de agua influye en la producción de biofertilizante, siendo el tratamiento uno el más eficiente debido a su alto contenido de agua, es decir, que las proporciones del sustrato determinan la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica. Giubi et al. (2019) expusieron que la codigestión de estiércol combinado con residuos agrícolas puede producir un mayor volumen de gas en comparación con la digestión de cada sustrato por separado. Tafase et al. (2018) también investigaron la eficiencia de la codigestión y encontraron que ciertas combinaciones de sustratos pueden generar un mayor volumen de biogás.

Montenegro et al. (2017) mencionan que la codigestión de diferentes residuos orgánicos puede promover la sinergia bioquímica y compensar las deficiencias de cada sustrato por separado. Por ejemplo, Li et al. (2011) identificaron que la adición de un cosustrato puede ayudar al equilibrio de la relación C:N y reducir la inhibición de amonio durante la digestión anaerobia de estiércol animal, especialmente bajo condiciones termofílicas. Sin embargo, señalaron que, bajo condiciones mesofílicas por debajo de 35°C, la codigestión puede ser inhibida y menos eficiente que la digestión de cada sustrato por separado, lo cual destaca la importancia de mantener la temperatura adecuada para obtener mejores rendimientos. En la misma línea, Singh et al. (2021) expusieron que la

proporción de residuos en la codigestión puede afectar el potencial de producción de biogás, destacando la importancia de equilibrar la relación C/N y estabilizar el pH. Por otro lado, Moreno (2021) encontró en su estudio particular que la producción de biogás fue mayor sin codigestión de estiércol bovino y residuos orgánicos, atribuyéndolo a la elevada acidez de los residuos orgánicos utilizados y la baja temperatura del digestor en el sitio de estudio.

La codigestión de diferentes sustratos puede proporcionar beneficios en términos de sinergia bioquímica y aumento de la producción. Sin embargo, las condiciones específicas de cada estudio y los parámetros ambientales deben tenerse en cuenta al implementar sistemas de biodigestión anaeróbica para maximizar la eficiencia y la producción de biogás a partir de residuos orgánicos. Tanto los hallazgos de esta investigación como las realizadas por otros autores indican que el tipo de sustrato utilizado, la composición de la mezcla de sustratos, la temperatura, el pH y el tiempo de retención son factores clave a considerar para optimizar el proceso de digestión anaeróbica y maximizar sus beneficios ambientales y agrícolas.

Estos resultados demuestran la viabilidad y eficiencia del biodigestor a escala para la producción de biogás y biofertilizante a partir de los residuos sólidos fermentables del instituto. La implementación de estrategias de gestión de residuos basadas en el uso de biodigestores anaeróbicos podría contribuir a la sostenibilidad y preservación del medio ambiente, al tiempo que se aprovechan los recursos energéticos y fertilizantes naturales generados. Estos hallazgos proporcionan información relevante para futuros proyectos relacionados con la producción sostenible de energía y fertilizantes en el contexto del instituto y otros entornos similares.

Conclusiones

La generación per cápita de residuos sólidos fermentables en el ISTMBR es de aproximadamente 0.01 kg por persona. Esto representa una producción diaria de 4.9 kg de residuos sólidos fermentables considerando a los 691 miembros de la comunidad educativa. Estos resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de reducción y manejo adecuado de estos residuos, y la valorización a través de biodigestores anaerobios se muestra como una opción prometedora para obtener beneficios energéticos y ambientales.

El estudio in situ de los parámetros ambientales durante el proceso de biodigestión mostró que los biodigestores prototipos mantuvieron una temperatura óptima para la operación mesofílica, con mínimas de 29.1 °C y máximas de 33.4 °C. Además, se encontraron valores adecuados de pH

durante las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Estos resultados indican que los parámetros ambientales se mantuvieron en rangos favorables para un desarrollo microbiano óptimo y una producción eficiente de biogás.

Se observaron diferencias significativas en el rendimiento de biogás entre los tratamientos utilizados en el biodigestor prototipo, siendo el tercer sustrato el más eficiente y el tratamiento 1 el menos eficiente. En cuanto al rendimiento de biofertilizante líquido, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. La producción de biofertilizante sólido también varió según el sustrato y el tiempo de degradación de la materia orgánica. Estos hallazgos demuestran la influencia del sustrato en la generación de biogás y biofertilizantes.

Referencias

1. Achinas, S., & Euverink, G. J. W. (2019). Feasibility study of biogas production from hardly degradable material in co-inoculated bioreactor. *Energies*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/en12061040>
2. Adeniran, A. E., Nubi, A. T., & Adelopo, A. O. (2017). Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. *Waste Management*, 67, 3–10. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.05.002>
3. Alvarez Macias, Y. D. (2020). Biodigestor anaeróbico para la producción de biogás en el cantón Santa Ana sitio Monte Oscuro [Universidad Estatal del Sur de Manabí]. In Repositorio UNESUM. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2751>
4. Alves Demeu, F., Lopes, M. A., Brandão Reis, E. M., Ribeiro Lima, A. L., de Melo Carvalho, F., Pascale Palhares, J. C., & Otenio, M. H. (2021). Economic viability of a canadian biodigester for power generation in dairy farming. *Semina: Ciencias Agrarias*, 42(1), 375–394. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021V42N1P375>
5. Apolo Valarezo, G. M. (2019). Diseño y emplazamiento de un biodigestor para el aprovechamiento de biogás en la granja de explotación porcina “Mis Tres Marías” Arenillas-El Oro-Ecuador [Universidad Politécnica Salesiana]. In Repositorio UPS. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16989>
6. Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos

- biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(2), 159–170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>
7. Canales-Gutiérrez, Á., Quispe-Aucca, B. J., Romero-Loaiza, R., Villafuerte-Prudencio, N., Ramos Pineda, J. R., Aguilar, J. M., & Canqui-Flores, B. (2021). Design of an anaerobic biodigester model as an alternative for methane generation. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(2), 81–91. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090200081x>
 8. Castillo Alvarez, Y., Monteagudo Yanes, J. P., Jiménez Borges, R., Diego, C., & Patiño Vidal, C. D. (2021). Propuesta de diseño de un biodigestor industrial de cachaza para la generación de energía eléctrica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), 74–80. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-021-01447-5>
 9. Coca Ramírez, V. R. (2021). El biodigestor como recurso didáctico en el aprendizaje del estudio de los biorreactores en la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. In Repositorio UNJFSC. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/4615>
 10. Díaz, W., Guitiérrez, S., & Villatoro, H. (2022). Factibilidad Técnica de un Biodigestor a partir de *Eichhornia Crassipes* (Lirio Acuático) para la Producción de Biogás en Honduras. 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-Pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions,” Hybrid Event. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.764>
 11. Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J., & Gómez, X. (2021). Biogas Production from Organic Wastes: Integrating Concepts of Circular Economy. *Fuels*, 2, 144–167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009>
 12. FAO. (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple. In Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es#:~:text=Según estima la FAO%2C los,de personas hambrientas cada año.>
 13. García-Herrero, L., De Menna, F., & Vittuari, M. (2019). Food waste at school. The environmental and cost impact of a canteen meal. *Waste Management*, 100, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.027>

14. Giubi, J., Bernal, M., & Cañete, F. (2019). Producción de Biogás a partir de residuos orgánicos generados en el Hospital de Clínicas: Un estudio preliminar. *Anales Científicos*, 52(3), 53–58. <http://dx.doi.org/10.18004/anales/2019.052.03.53-058>
15. Granzotto, F., Aita, C., Silveira, D. D., Mayer, F. D., Pujol, S. B., Piñas, J. A. V., & Hoffmann, R. (2021). Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105795>
16. Hernández-Sampieri, R., & Mendoza-Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. In *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2nd ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V.
17. INEC. (2021). Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2020. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2020/Residuos_solidos_2020/Presentacion_residuos_2020.pdf
18. Jimenez Aranda, C. E., & García Calle, E. (2020). Eficacia del empleo de estiércol de ganado porcino y cáscara de café, en la producción de biogás y digestatos líquidos, Jaén, Cajamarca, Perú [Universidad Nacional de Jaén]. In Repositorio UNJ. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/171>
19. Khanh Nguyen, V., Kumar Chaudhary, D., Hari Dahal, R., Hoang Trinh, N., Kim, J., Chang, S. W., Hong, Y., Duc La, D., Nguyen, X. C., Hao Ngo, H., Chung, W. J., & Nguyen, D. D. (2021). Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel*, 285, 119105. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119105>
20. Klee, A. J., & Carruth, D. (1970). Sample Weights in Solid Waste Composition Studies. *ASCE96 (SA4) Proc. Paper 7469*, 945–954.
21. León Torres, C. A., Nomberto Rodríguez, C., Mendoza Avalos, G. A., Bardales Vásquez, C. B., Cabos Sánchez, J., & Barrena Gurbillón, M. A. (2019). Design and implementation of a Biogas, Biol and Biosol production pilot plant. *Arnaldoa*, 26(3), 1017–1032. <https://doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311> ISSN:

22. Li, Y., Yan, X. L., Fan, J. P., Zhu, J. H., & Zhou, W. Bin. (2011). RETRACTED: Feasibility of biogas production from anaerobic co-digestion of herbal-extraction residues with swine manure. *Bioresource Technology*, 102(11), 6458–6463.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.03.093>
23. Montenegro Orozco, K. T., Rojas Carpio, A. S., Cabeza Rojas, I., & Hernández Pardo, M. A. (2017). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista ION*, 29(2), 23–36.
<https://doi.org/10.18273/REVION.V29N2-2016002>
24. Morán, S. (2020). Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030. Plan V: Crisis de La Basura Parte 2.
<https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/ecuador-ahogado-basura-esta-lejos-cumplir-metas-ods-al-2030>
25. ONU. (2021). El desperdicio masivo de alimentos, un problema no solo de los países ricos. Noticias ONU (Organización de Las Naciones Unidas).
<https://news.un.org/es/story/2021/03/1489102>
26. Sanabria Vindell, O. J., Sánchez Melgara, A. E., & Rodas Espinoza, Y. S. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el año 2017 [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. In Repositorio UNAN.
<http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/9367>
27. Sandoval, E. (2015). Propuesta para el manejo de residuos sólidos institucionales en la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Campus Tuxpan [Universidad Veracruzana]. In Repositorio CdigitalUV. <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/42358>
28. SENESCYT. (2020). Boletín Anual - Análisis anual de los principales indicadores de educación superior, ciencia, tecnología e innovación (SENESCYT).
https://www.educacionsuperior.gob.ec/wp-content/uploads/2020/09/Boletin_Anual_Educacion_Superior_Ciencia_Tecnologia_Innovacion_Agosto2020.pdf
29. Singh, P. K., Srichandan, H., Ojha, S. K., Pattnaik, R., Verma, S. K., Pal, S., Singh, J., & Mishra, S. (2021). Evaluation of biomethane potential of codigested sheep manure and

- kitchen refuse. *Biomass Conversion and Biorefinery*, September, 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01961-5>
30. Tafase Mosisa, F., Shunki Tibba, G., & Hasan, N. (2018). Design and Implementation of Biogas System from Dining Hall Waste of Students Cafeteria at Jimma Institute of Technology, Ethiopia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(5), 20–24. <http://www.ripublication.com>
31. Vásquez Dávalos, S. E. (2020). Dimensionamiento de biodigestor a partir de la caracterización y análisis de residuos sólidos orgánicos de la cafetería CETYS Universidad [Centro de Enseñanza Técnica y Superior]. In Repositorio CETYS. <https://repositorio.cetys.mx/handle/60000/1231>
32. Vikrant, D., & Shekhar, P. (2013). Generation of Biogas from Kitchen Waste - Experimental Analysis. *International Journal of Engineering Science Invention*, 2(10), 15–19.
33. Wilkie, A. C., Graunke, R. E., & Cornejo, C. (2015). Food waste auditing at three Florida schools. *Sustainability (Switzerland)*, 7(2), 1370–1387.
<https://doi.org/10.3390/su7021370>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).