

# Aprovechamiento energético de residuos orgánicos de fincas cafeteras en el departamento del Tolima, Colombia

Artículo largo



Mauricio Hernández-Sarabia\*; Juan Sierra; Liliana Delgadillo

Grupo de Investigación GMAE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ibagué, Colombia

\*mauricio.hernandez@unibague.edu.co

## Resumen

En las fuentes hídricas del departamento del Tolima se estima un vertimiento de aguas mieles producto del beneficio del café, de 4000 toneladas/año de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de carga orgánica. Una alternativa para la mitigación de esta contaminación hídrica es la co-digestión anaerobia (estiércol de cerdo y aguas mieles), en biodigestores tipo Taiwán. Con el apoyo de la Gobernación del Tolima y el Sistema General de Regalías, se financió la instalación de 30 biodigestores. En este artículo se presenta la evaluación de 6 biodigestores, ubicados desde 1185 a 2006 msnm. El potencial de biogás promedio fue de 1484 kg/día, con un rango de concentración de CH<sub>4</sub> entre 44,5 % y 59,3 %v, tras su paso por el filtro de H<sub>2</sub>S. El biogás producido fue aprovechado mediante un sistema térmico asistido, para suministrar energía adicional a los secadores solares en el proceso de secado del café pergamino, principalmente.

### Palabras clave:

Aguas mieles de café; Aprovechamiento térmico; Beneficio de café; Biogás; Digestión anaeróbica; Secado de café; Pergamino.

## Energy use of organic waste from coffee farms in Tolima, Colombia

### Abstract

In the water sources of the department of Tolima, it is estimated that 4,000 tons/year of Biochemical Oxygen Demand (BOD) of organic load are discharged into the water sources from coffee processing. One alternative for mitigating this water pollution is anaerobic co-digestion (pig manure and coffee's honey water) in Taiwan-type biodigesters. With the support of the Governor's Office of Tolima and the General Royalties System, the installation of 30 biodigesters was financed. This article presents the evaluation of 6 biodigesters, located from 1,185 to 2,006 meters above sea level. The average biogas potential was 1,484 Kg/day, with a CH<sub>4</sub> concentration range between 44,5 % and 59,3 %v after passing through an H<sub>2</sub>S filter. The biogas produced was used by means of an assisted thermal system to supply additional energy to the solar dryers in the parchment coffee drying process, mainly.

### Keywords:

Agroindustrial coffee process; Coffee honey water; Anaerobic digestion; Thermal utilization; Biogas; coffee drying.

**Forma de citar:** Hernández-Saravia, M., Sierra, J., y Delgadillo, L. (2021). Aprovechamiento energético de residuos orgánicos de fincas cafeteras en el departamento del Tolima, Colombia. RedBioLAC, 5, 29-34.

## Introducción

El departamento del Tolima presenta una productividad agrícola cafetera de 119 490,27 toneladas obtenidas de un área de 102 253 hectáreas, que representa el 12,2 % de la producción total en Colombia, lo que le otorga el tercer lugar a nivel nacional, (Agronet, 2019). La actividad cafetera del Tolima impacta en la economía de más de 61 358 familias en la región, es decir, cerca del 68 % de su población rural (Federación Nacional de Cafeteros, 2021). La generación de residuos producto de la agricultura cafetera a nivel nacional es de 12 000 toneladas, conformados por residuos ordinarios, reciclables, borra y peligrosos. Debido a esta alta cantidad de residuos se ha estimado una contribución a los GEI en un 6,2 % para el año 2018 y una tasa de consumo de agua 95 litros/kg cps. Aproximadamente 4000 toneladas de DBO/año, son vertidas en las fuentes hídricas de la región, (Federación Nacional de Cafeteros, 2018).

Las actividades agropecuarias en la zona rural del Tolima involucran la crianza y producción pecuaria de animales bovinos (3,9 %) y porcinos (1,18 %) (ICA, 2021). Por tal razón, la generación de materia orgánica (excretas) son una fuente de contaminación ambiental debido a sus agentes patogénicos y aporte al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De ahí que las fincas cafeteras requieran de un sistema de mitigación frente al impacto ambiental generado tras las actividades agropecuarias en conjunto con el proceso de postcosecha del café. En ese sentido, la implementación tecnológica del biodigestor ha demostrado ser una alternativa eficiente, (Rojas-Reina *et al.*, 2020).

La digestión anaerobia es el proceso de descomposición de la materia orgánica sometida a un ambiente ausente de oxígeno y exposición a microorganismos metanogénicos para la producción de biogás, (Rivas, 2010). Mediante este proceso el biodigestor es una herramienta para el tratamiento de los residuos empleados como sustratos de alimentación. De igual manera, es una fuente de producción de biofertilizante por las propiedades fisicoquímicas del biol (Trejo-Lizama, 2020). El potencial energético del biogás producido por digestión anaerobia es de 5,9 kWh de electricidad equivalente de 1 m<sup>3</sup> (60 %v CH<sub>4</sub>), (Salman, 2017). La producción de biogás previene la tala de árboles, debido a que la cantidad mencionada anteriormente de producción de biogás equivale a 1,6 kg de leña/persona-día y a su vez, mejora la calidad de vida de los caficultores al discontinuar el uso de la leña (Herrero, 2019).

Inicialmente, la aplicación del biogás es para uso como biocombustible en la cocción de alimentos. Sin embargo, los estudios que se llevan actualmente en este campo han propuesto su uso para la agricultura cafetera en el proceso de secado del café, mediante la innovación tecnológica que expone el sistema térmico asistido por biogás, se estima un uso aproximado de cuatro horas de biogás por día para

preservar una temperatura de 40 °C en la marquesina, (Hernández-Sarabia *et al.*, 2021).

## Metodología

### Ubicación de los biodigestores y sistemas térmicos

Los 30 biodigestores instalados se encuentran distribuidos en 13 de los 47 municipios del departamento del Tolima, en las zonas rurales cafeteras montañosas en un rango entre 1185 y 2006 metros sobre el nivel del mar (msnm) y temperaturas ambientes promedio entre 15 °C y 34 °C. La evaluación del desempeño de los biodigestores se enfocó en factores como: producción de biogás, concentración de metano del biogás generado y aprovechamiento del biogás producido. En este sentido, se seleccionaron seis sistemas térmicos asistidos por biogás (STAB). La selección se realizó teniendo en cuenta el acceso a la zona rural y la disposición de los productores para el manejo y toma de datos.

### Caracterización de los residuos

El estiércol de cerdo y las aguas mieles fueron empleadas en la alimentación de cada uno de los biodigestores. El proceso se estandarizó entre 70 a 80 L/día en co-digestión de estiércol/aguas mieles, mediante una proporción de 70 %/30 %, respectivamente, en una dilución con agua en proporción 1:3. De esta manera se estableció un tiempo de retención hidráulico para cada uno de los biodigestores, entre 40 a 45 días en promedio, tiempo flexible debido a las condiciones climáticas y de alimentación de 3 a 4 veces por semana, más la disposición de estiércol, de las aguas mieles de café según la frecuencia de recolección y la alimentación del biodigestor programada por los productores de acuerdo con sus labores diarias.

### Biodigestor y filtro de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)

Los biodigestores tienen un volumen de 4,71 m<sup>3</sup>, construidos en membrana de PVC y PP, con una longitud de 6 m y un diámetro de 1 m. Además, cuentan con filtro de ácido sulfhídrico para la remoción de este ácido en el biogás, en la primera etapa emplean carbón activado y en la segunda etapa óxido de hierro.

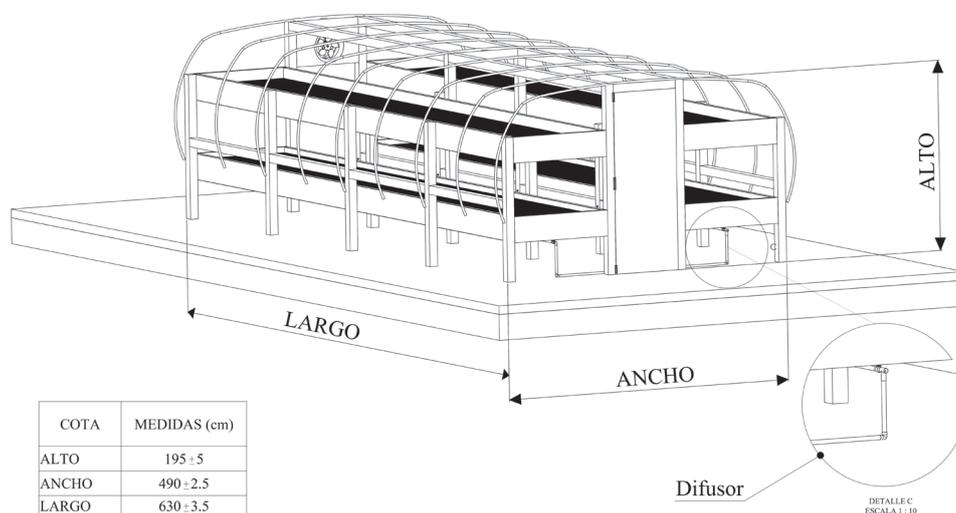
### Sistema térmico asistido por biogás (STAB)

El STAB instalado consta de un motor ventilador de 0,37 kW(1/2HP) y 1800 revoluciones por minuto (rpm), alimentado a 110 V<sub>CA</sub>. Este motor es empleado para tomar aire del ambiente y calentarlo mediante un quemador tipo flauta donde se hace la combustión del biogás, hasta una temperatura entre 40 a 45 °C. Mediante la transferencia de energía entre los gases de combustión del biogás y el aire ambiente captado por el motor ventilador en un

intercambiador de calor de flujo cruzado, se garantiza que estos gases de combustión no tienen contacto con el aire para el secado, esto evita una posible contaminación que pueda afectar la calidad del café.

Secador solar de café (Marquesina) y difusor de aire caliente (DAC)

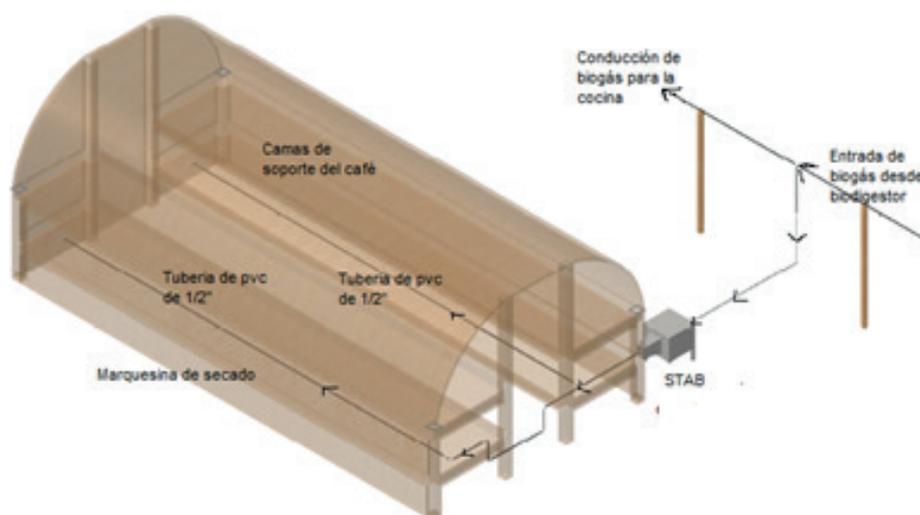
La marquesina empleada en el proceso presenta unas dimensiones que se ilustran en la **Figura 1**.



**Figura 1** | Plano dimensional de la marquesina y sus dimensiones.

Diseñadas en madera de la región con soportes y arcos de PVC, con una cubierta de lona plástica de polietileno con resistencia a los rayos ultravioleta, cuenta con dos hileras internas de doble cama que soportan el café para el secado en una malla plástica con soporte de madera. El DAC consta de un acople de 4 pulgadas con reducción a 1/2 in, para el

ingreso del aire caliente proveniente del STAB. La tubería del difusor, que es de la longitud de la marquesina, cuenta con agujeros de 12 mm de diámetro cada 10 cm de longitud, para la distribución homogénea del aire caliente en toda el área de la marquesina de secado. La **Figura 2**, presenta un esquema del sistema DAC instalado en las fincas cafeteras.



**Figura 2** | Esquema general del sistema de difusor caliente DAC.

### Mediciones de concentración del biogás, presión y temperatura en el biodigestor

Se utilizó el equipo Multitec® 540 SEWERIN. La concentración del biogás se midió a la salida del filtro de ácido sulfhídrico del biodigestor y las concentraciones de

H<sub>2</sub>S a la entrada y salida. La presión interna del biodigestor se midió en el mismo punto a la salida del filtro, se usó un manómetro en U de columna de agua, con un rango de 0 a 30,5 centímetros de agua. Todas las mediciones fueron tomadas por triplicado, y se obtuvo el promedio aritmético y la desviación estándar. La temperatura se midió por medio

de un termómetro digital con un rango entre -50 a 75 °C. Cada medición se tomó en un intervalo de 10 minutos durante un periodo de una hora; así se obtuvo el promedio aritmético de esta variable en la zona de ubicación del

biodigestor. A los biodigestores ubicados se les instaló cubierta plástica (**Figura 3**), similar a la utilizada en las marquesinas para incrementar la temperatura interna.



**Figura 3** | Cubierta de biodigestores.

Asimismo, en la fosa donde se instaló el biodigestor, se instaló una lona de tela para aislarlo del suelo. Las temperaturas fueron tomadas durante los meses de junio y julio de 2021.

### Cálculo de potencial de energía

El potencial de energía se calculó mediante un código desarrollado con el software de Python, con base en las variables obtenidas del seguimiento y control del STAB tales como: altura en columna de agua, temperatura del entorno en el biodigestor, dimensiones del biodigestor y la concentración del biogás, con base en la ley de gases

ideales. De esta forma, se determinó la capacidad energética del biodigestor en términos de masa de biogás ( $m_{\text{biogás}}$  kg) y su equivalente en electricidad (kWh), teniendo en cuenta la relación hallada en la investigación de Salman *et al.*, (2017). El volumen de biogás dentro del biodigestor se calculó de acuerdo con las condiciones de trabajo establecidas desde el diseño y verificadas en campo.

### Resultados y discusión

El proceso de seguimiento y control de los STAB se obtuvo de las mediciones consignadas en la **Tabla 1**, de acuerdo con las variables de operación de interés en este estudio.

**Tabla 1** | Caracterización de STAB de las seis fincas de estudio.

Municipio	Ataco	Chaparral	Dolores	Planadas	Rioblanco	Villahermosa
Finca	Lindosa	La Alcancía II	Kamala	Costa Rica	La Miranda	El Placer
CH <sub>4</sub> (% Vol.)	49,9 ± 0,76	58,0 ± 0,25	52,7 ± 0,40	58,4 ± 0,98	52,6 ± 1,00	45,7 ± 1,25
CO <sub>2</sub> (% Vol.)	22,1 ± 1,45	22,0 ± 1,23	34,2 ± 1,55	29,2 ± 1,91	18,0 ± 1,24	40,0 ± 2,10
H <sub>2</sub> S (ppm) E.**	235,5 ± 2,5	227,0 ± 4,3	242,5 ± 4,9	208,4 ± 5,2	221,2 ± 7,1	197,3 ± 3,1
H <sub>2</sub> S (ppm) S.**	47,5 ± 0,35	45,3 ± 0,71	48,2 ± 0,36	40,9 ± 1,90	42,7 ± 2,90	38,4 ± 2,52
T. bio. (°C) *	30,1 ± 0,64	37,2 ± 1,05	33,1 ± 0,74	35,0 ± 1,12	33,4 ± 0,87	32,1 ± 0,91
P. (cm H <sub>2</sub> O) *	3,80	12,70	5,08	10,00	12,00	3,81
$m_{\text{biogás}}$ (kg) *	1467	1579	1559	1468	1362	1467
Equi. (kWh) *	8,8	12,4	9,2	9,7	8,0	8,6

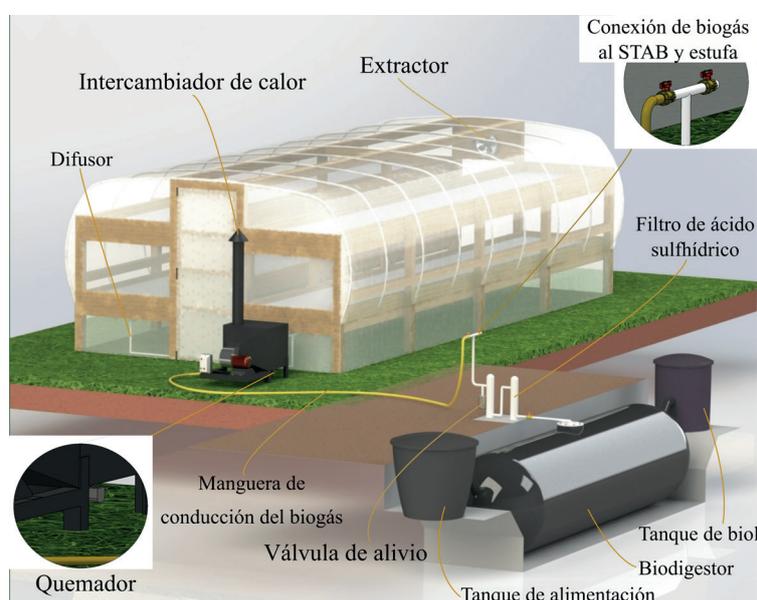
\*Temperatura biodigestor, presión, masa de biogás y equivalencia eléctrica. \*\* Entrada y salida.

Debido a las condiciones de geolocalización y meteorológicas de las fincas de estudio, y a la varianza del proceso de alimentación de los biodigestores, se puede evidenciar una producción potencial de biogás entre 1362 a 1597 kg/día, suficiente energía para la cocción de alimentos, (Castro, 2017). Por lo cual, cada sistema dispone de alrededor de un 30 % del volumen total del biodigestor y una capacidad entre 8,0 a 12,4 kWh/día, energía limpia que se produce mediante un generador, (Giwa, 2020). La producción de metano se encuentra en el rango establecido por las fincas de estudio y son similares a los reportados en el estudio realizado por Hernández-Sarabia.

En las mediciones tomadas de  $H_2S$  antes y después del filtro, se obtuvo una remoción de aproximadamente del 80 %, de

esta forma se previno la corrosión de las partes metálicas de la estufa y la toxicidad del biogás en el entorno como lo reporta también (Martín Herrero, 2019).

El diseño STAB de la **Figura 4** se ha realizado para el aprovechamiento del potencial de energía calculado para cada finca, a través del funcionamiento del intercambiador de calor, quemador y difusor. De esta manera, se pretende acelerar el proceso de secado del café, ingresando aire a la marquesina a 40 °C. No obstante, el sistema cuenta con un extractor de aire para el control de la temperatura interna de la marquesina (> 45 °C), ya que se busca las condiciones de un secado para cafés especiales. Actualmente, se realizan pruebas piloto a fin de estandarizar el uso del biogás hasta 4 horas/día promedio dentro del proceso de secado.



**Figura 4** | Sistema térmico asistido por biogás instalado en fincas cafeteras del Tolima.

El uso del biogás producido mediante la mezcla de sustrato para la co-digestión estandarizada en el estudio para la alimentación de los biodigestores, reduciría la actual aportación de las emisiones agregadas de GEI procedente del estiércol de cerdo en un 40 % (4,87 kg de  $CO_2$ ), a raíz del uso del biocombustible en el proceso de secado de café, (Philippe, 2015).

## Conclusiones

De acuerdo con los parámetros de evaluación de los biodigestores analizados, se tiene que la finca La Alcancía II dispone del mejor desempeño comparada con las demás. Esto debido a que presenta una producción de 1579 kg de masa de biogás correspondiente a una concentración de metano del  $58,0 \% \pm 0,25$ , desarrollada a una temperatura de  $37,2 \text{ °C} \pm 1,05$  en la zona del biodigestor. Además, el aprovechamiento de los residuos generados (estiércol de cerdo y aguas mieles) de la finca, dispone de una equivalencia eléctrica de 12,4 kWh, se podría aprovechar

mediante el uso de un generador eléctrico. No obstante, el aprovechamiento de tales residuos en las fincas de estudio se establece como una mejora para el secado del café a raíz de la implementación del STAB, ya que la energía producida permite desarrollar un proceso aún en condiciones climáticas no favorables. Por lo tanto, se evita la contaminación de las fuentes hídricas al disponer de una nueva fuente de energía para la cocción de alimentos, esto minimizaría la tala de árboles y afectaciones a la salud del caficultor. En consecuencia, el sistema térmico asistido por biogás desarrolla una contribución de sostenibilidad a la agricultura cafetera en mediación con el cuidado del medioambiente.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Gobernación del Tolima en la financiación del proyecto, código BPIN 2016000100049, Innovación de procesos a nivel de

poscosecha para la incorporación de valor agregado en la diferenciación de cafés especiales del Tolima, convenio de cooperación especial convenio N1874-2018. De igual manera, a la Universidad de Ibagué por el apoyo financiero, técnico y administrativo del proyecto código 18-487-ESP.

## Referencias

- Agronet. (2019). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. Agronet. Ministerio de Agricultura. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Castro, L., Carballo, M., Martí-Herrero, J., y Escalante, H. (2017). Monitoreo a escala de real de un digestor anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal. *RedBioLAC*, 1, 37-43.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2018). Informe de Sostenibilidad. 2015-2018. <https://federaciondefcafeteros.org/app/uploads/2019/11/Informe-de-Sostenibilidad-2015-2018.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). Estadísticas Cafeteras. Recuperado el 5 de agosto <https://federaciondefcafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>
- Giwa, A. S., Ali, N. & Asif, M., (2020). Swine manure valorization in fabrication of nutrition and energy. *Applied Microbiology Biotechnology*, 104, 9921-9933. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10963-8>
- Hernández-Sarabia, M., Sierra-Silva, J., Delgadillo-Mirquez, L., Ávila-Navarro, J., & Carranza, L. (2021). The potential of the biodigester as a useful tool in coffee farms. *Applied Sciences*, 11, 6884. <https://doi.org/10.3390/app11156884>
- ICA, Instituto Colombiano Agropecuario. (2021). Censo Pecuario Nacional. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Martí-Herrero, J. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. *RedBioLAC*.
- Philippe, F. X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture Ecosystem, & Environment*, 199, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Rivas, O. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. (2010). *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1), 39-46.
- Rojas-Reina, C. J., Mosquera Beltrán, Y. N., Acosta Dueñas, L. J., Carrillo Malpica, M. F., Parra Ortiz, M. A., y Lara Murcia, L. A. (2020). Estudio integral de un biodigestor desde el punto de vista microbiológico y uso del biol como bioabono en Los Llanos Orientales de Colombia. *RedBioLAC*, 4, 107-112.
- Salman, C. A., Schwede, S., Thorin, E., & Yan, J. (2017). Enhancing biomethane production by integrating pyrolysis and anaerobic digestion processes. *Applied Energy*, 204, 1074-1083. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.006>
- Trejo-Lizama W., Uicab, A. J., y Castillo-Caamal J. (2020). Evaluación del efluente de biodigestor como fertilizante orgánico en cultivo de maíz. *RedBioLAC*, 4, 125-129.