

Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio dos digestores operando bajo condiciones psicrófilicas

Estudio de caso



Juan Guillermo Jaramillo Arango*; Paula Rodríguez Cortés; Jaime Jaimes-Estévez; Liliana Castro Molano; Humberto Escalante Hernández

Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia

*ingjaramillo1108@gmail.com

Resumen

En las zonas frías y apartadas del país se ha venido implementando la digestión anaeróbica para suplir la escasez de combustible. Como alternativa para mejorar las condiciones térmicas del bioproceso se han instalado invernaderos, pero su efectividad no se ha concretado cuantitativamente. Este caso de estudio da una descripción termodinámica de los flujos de calor en dos biodigestores de bajo costo (BDGs), el primero (BDG-1) con un invernadero, el segundo (BDG-2) expuesto al ambiente. El lodo del BDG-1 aumentó 1,4 °C respecto de la temperatura del suelo. El lodo del BDG-2 permaneció en equilibrio con el suelo. Se evidenció que gran parte del calor que llega al lodo pasa al suelo (99 % BDG-1, 73 % BDG-2). Se encontró que la condición térmica del lodo es afectada por la cantidad de superficie, pero es independiente de las condiciones ambientales.

Palabras clave:

Comportamiento térmico; Digestión anaeróbica; Invernadero; Psicofilia; Temperatura de digerido.

Effect of bioclimatic design on thermal behavior: case study of two digesters operating under psychrophilic conditions

Abstract

Anaerobic digestion has been implemented in the cold and remote areas of the country to meet fuel shortages. As an alternative to improve the thermal conditions of the bioprocess, greenhouses have been installed, but their effectiveness has not been quantitatively specified. This case study gives a thermodynamic description of the heat fluxes in two BDGs, the first (BDG-1) with a greenhouse, the second (BDG-2) exposed to the environment. The BDG-1 mud increased 1.4 °C with respect to the soil temperature. The BDG-2 mud remained in equilibrium with the ground. It was evidenced that a large part of the heat that reaches the mud passes to the ground (99 % BDG-1, 73 % BDG-2). It was found that the thermal condition of the mud is affected by the amount of surface, but it is independent of the environmental conditions.

Keywords:

Anaerobic digestion; Digestate temperature; Greenhouse; Psychrophilia; Thermal performance.

Forma de citar: Jaramillo Arango, J. G., Rodríguez Cortés, P., Jaimes-Estévez, J., Castro Molano, L., y Escalante Hernández, H. Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio dos digestores operando bajo condiciones psicrófilicas. RedBioLAC, 5, 4-8.

Introducción

En Colombia, en los últimos años se ha difundido la implementación de biodigestores de bajo costo (BDGs) para suplir la demanda energética en zonas rurales mediante digestión anaeróbica (DA). La DA es afectada significativamente por la temperatura; de manera que las condiciones mesofílicas (25 a 42 °C) favorecen la velocidad de producción y calidad del biogás. Por el contrario, condiciones de temperatura en el rango psicrófilico ($T < 25$ °C) afectan negativamente el bioproceso (Dev *et al.*, 2019).

A nivel rural, en climas fríos, se ha popularizado el uso de invernaderos como una alternativa para mejorar las condiciones térmicas del proceso anaerobio. Garfí *et al.*, (2011) recomiendan el uso del invernadero como un medio protector externo de las pequeñas y medianas plantas de biogás, pero no han concretado cuantitativamente su

efectividad para contrarrestar el efecto térmico en zonas de temperaturas bajas.

Por lo anterior, el objetivo de este caso de estudio fue comparar la transferencia de calor a partir de condiciones reales, de dos BDGs bajo ambientes psicrófilicos, con diseños bioclimáticos diferentes. El primero, BDG-1, protegido por un invernadero; el segundo, BDG-2, expuesto al ambiente. Ninguno de los digestores fue aislado térmicamente del suelo. El análisis de este caso de estudio permite cuantificar los flujos de calor en BDGs con diseños bioclimáticos diferentes.

Descripción del caso

Se evaluó el comportamiento térmico de dos BDG instalados en climas fríos. En la **Tabla 1** se presentan las características de los digestores de este caso de estudio.

Tabla 1 | Características BDGs.

Parámetro	BDG-1*	BDG-2
Ubicación	Güicán-Boyacá (6°27'45.0"N 72°24'43.0"O)	Cáchira-Norte de Santander (7°44'7.0"N 73°3'6.0"O)
Altitud [m.s.n.m.]	2963	1882
Temperatura ambiente [°C]	16,6 ± 6.0	17,8 ± 3,1
TRH [d]	35	75
Volumen de operación [m³]	101,0	5,2
Caudal [m³/d]	4,16	0,07
Alimento (sustrato)	Estiércol Porcino y agua (1:6)	Estiércol Bovino y agua (1:3)
Diseño bioclimático	Invernadero de plástico	Sin invernadero
Material del BDG	Polipropileno transparente	Geomembrana oscura
Año de instalación	2013	2019
Uso del biogás	Lámparas de calor	Cocción de alimentos

*El BDG-1 fue diseñado e instalado directamente por los propietarios de la granja.

Para la descripción de los flujos de calor que se intercambian en los BDGs, se utilizó un modelo unidimensional para climas fríos (Perrigault *et al.*, 2012). Para el desarrollo del modelo, se determinaron los perfiles horarios de irradiancia (*Irr*) según metodología de Duffie y Beckman (2013) y los valores reportados en el atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia (Benavides *et al.*, 2017). Se realizó el registro horario de la temperatura ambiente (T_{amb}), la temperatura del invernadero (T_{ai}), la temperatura del lodo en el volumen de operación (T_L) y la temperatura del suelo (T_s) durante 13 semanas (2160 horas de seguimiento). Para el presente caso de estudio se seleccionó un día representativo (condiciones climáticas promedio de cada lugar) respecto del comportamiento de toda la serie de datos. Para el registro de las temperaturas se instalaron sensores (dataloggers HOBO Pendant®) como se muestra en la **Figura 1**. Las suposiciones del modelo y las ecuaciones utilizadas son las reportadas por Perrigault *et al.*, (2012).

Resultados

En la **Figura 2** se presentan los perfiles horarios de temperatura para un día de operación, en cada digestor. En esta figura, las líneas continuas con puntos hacen referencia a los datos registrados. Los resultados del modelo se presentan como líneas discontinuas para las superficies plásticas del invernadero (T_{pe} : pared este, T_{po} : pared oeste, T_c : cubierta) y la manga (T_m), así como una línea continua y sin puntos para el biogás (T_b).

Durante el periodo diurno, la llegada de la radiación solar se expresó como un aumento de temperatura, mientras que en el periodo nocturno ocurrió un enfriamiento promovido por las condiciones ambientales. Para el BDG-1 y para el BDG-2 las temperaturas del suelo y del lodo fueron de 16,4 y 17,8 °C y 20,4 y 20,6 °C respectivamente. Durante el tiempo de monitoreo, estas temperaturas no

fluctuaron ($\pm 0,1$ °C BDG-1, $\pm 0,01$ °C BDG-2) debido a que los BDGs no cuentan con un sistema de aislamiento con el suelo. En el lodo del BDG-1 se alcanzó un aumento de $1,4$ °C con respecto a la temperatura del suelo, por el contrario, en el lodo del BDG-2 la temperatura permaneció igual a la del suelo con una fluctuación de $\pm 0,2$ °C. Estos resultados sugieren que aun cuando los BDGs no están aislados térmicamente con el suelo, la implementación de un invernadero presenta un aumento de temperatura en comparación a la ausencia de esta construcción. Bajo las condiciones de temperatura mínima ambiente (BDG-1 $9,8$ °C, BDG-2 $13,6$ °C), en los casos estudiados se presentó el mismo aumento de temperatura en lodo (7 °C) en comparación con el ambiente. Este resultado demuestra que el incremento de temperatura en el lodo fue independiente de las condiciones ambientales, diseño bioclimático y tamaño del digestor estudiados. Se infiere que en los BDG evaluados se obtuvo el mismo aumento de temperatura del lodo con respecto a la mínima ambiente dado que Colombia es un país geotérmicamente activo (Ministerio de Minas y Energía, 2000), lo que indica inercia térmica del suelo, es decir temperaturas constantes independiente del cambio de temperatura ambiente. Adicionalmente, en los casos estudiados, los resultados muestran que el comportamiento

térmico de todas las superficies plásticas (c, pe, po, m) y las fases gaseosas (ai, b) siguieron la tendencia ondular del ambiente. Esto demuestra el adecuado funcionamiento de los sensores y del modelo matemático utilizado. En la **Figura 3** se muestran los valores de flujo de calor transferido por los mecanismos de radiación, convección y conducción para cada caso evaluado. En el BDG-1, provisto del invernadero, se encontró que la llegada de la radiación solar directa aumenta la temperatura del plástico del invernadero promoviendo las interacciones radiativas entre todas sus superficies y una transferencia de calor con el aire en su interior. Durante el día, la transferencia de calor por convección a través del aire del invernadero es despreciable ($1-5w$) debido al escaso movimiento del fluido. El mecanismo de conducción se presenta entre el lodo y el suelo. Los resultados muestran una tasa de transferencia menor para el BDG-2, debido a su equilibrio térmico con el suelo. La transferencia de calor para los casos evaluados se explica a continuación: Una parte de la energía transferida ($75,5$ % BDG-1, $95,6$ % BDG-2) se devuelve al ambiente por mecanismo radiativo y convectivo. Lo anterior implica que el biogás y la manga generan una resistencia térmica con el ambiente similar a la del invernadero.

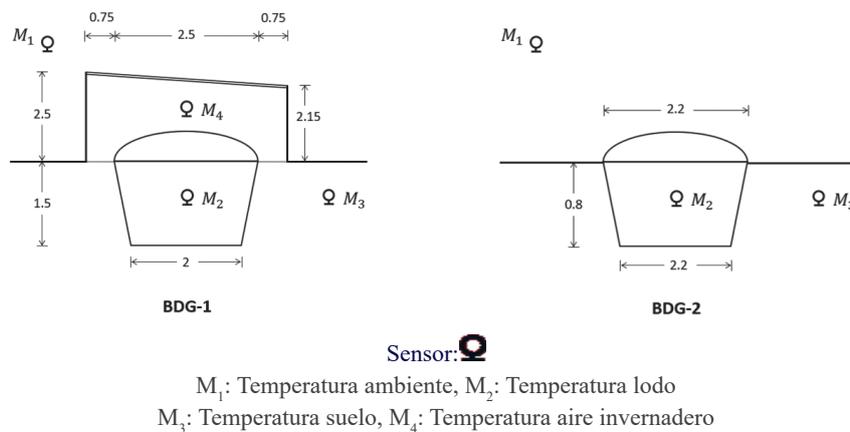


Figura 1 | Ubicación de los sensores para medir temperatura e iluminancia en los BDGs caso de estudio. Dimensiones reportadas en metros.

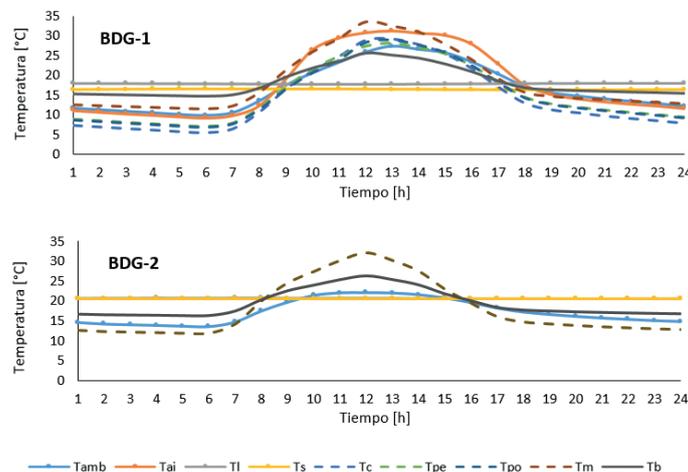


Figura 2 | Perfiles horarios de temperaturas.

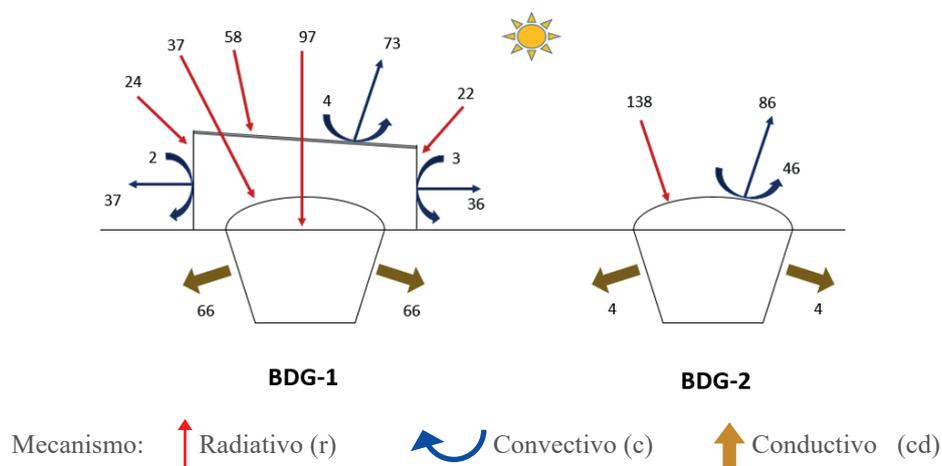


Figura 3 | Perfil de flujo de calor. Los datos están expresados en unidades de w/m^2 .

Con respecto al análisis del flujo de calor específico transferido al lodo, se encontró que la transferencia radiativa (solar directa y radiación térmica) en el BDG-1 fue de $60,3 \text{ mW/kg}$ lodo y en el BDG-2 $10,3 \text{ mW/kg}$ lodo. Esta diferencia se debe a las características del material de los BDGs. Por otra parte, el calor transferido hacia el suelo fue $59,8 \text{ mW/kg}$ lodo para el BDG-1 y $7,5 \text{ mW/kg}$ lodo para el BDG-2. Esto indica que el BDG-1 tiene una mayor fuerza impulsora de la transferencia de calor debido a su diferencia de temperatura con el suelo. Sin embargo, dado que el aumento de temperatura en BDG-1 es de $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$, es un indicativo de que la transferencia de calor es independiente del uso de invernadero si el BDG no está aislado con suelo.

El modelo matemático de transferencia de calor aplicado en este estudio es unidimensional, donde la variable que influye es la relación área/volumen entre el lodo y el suelo. La relación área/volumen de transferencia de calor fue de $1,0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y $1,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para BDG 1 y BDG2 respectivamente. Esta relación evidencia que las geometrías de los digestores evaluados son similares. Por otra parte, de acuerdo con los estudios realizados por Perrigault *et al.* (2012), el tipo de sustrato (estiércol bovino o porcino) no influye en la evaluación térmica de los BDGs. Basado en lo anterior, es posible concluir que los BDG1 y BDG 2 son comparables desde el punto de vista térmico.

Lecciones aprendidas y recomendaciones

El aislamiento es el principal parámetro térmico a tenerse en cuenta para el diseño, montaje e instalación de un BDG, en climas fríos. Se recomienda como aislante para las paredes de la zanja, láminas de icopor de 5cm para BDGs ubicados en zonas rurales, dado que la principal pérdida de calor se evidencia con el suelo.

Es necesario promover la recepción de radiación solar directa sobre el BDG. Por esta razón, se recomienda ubicar el sistema anaerobio lejos del sombreado ofrecido por las arboledas y construcciones cercanas, especialmente en el trayecto del sol (sentido este-oeste). El digerido que se produce en el BDG promueve el crecimiento de pastos y malezas sobre el suelo alrededor del digestor. Esta situación afecta negativamente el aprovechamiento de la radiación solar en el BDG. Por lo anterior, se recomienda sembrar plantas acuáticas en el tanque de recepción del digerido y hacer mantenimiento para despejar vegetación alrededor del digestor.

Si el BDG ya se encuentra instalado, no cuenta con aislante en la zanja y se requiere mejorar las condiciones térmicas, no es recomendable invertir recursos en la construcción de un invernadero, debido a que este solo ofrece protección física.

Es importante implementar programas para la formación continua a los usuarios de los BDGs en implementación, uso y mantenimiento de diseños bioclimáticos para climas fríos.

Conclusiones

Mediante la evaluación de transferencia de calor en dos BDGs bajo condiciones psicofílicas y condiciones bioclimáticas diferentes, se evidenció que: a) La mayor parte del calor que llega al lodo (99 % BDG-1, 73 % BDG-2) pasa directamente al suelo; b) el invernadero no cumple la función para la que fue planeado; y c) la relación área/volumen de la transferencia de calor en cada BDG fue una variable útil para comparar térmicamente los biodigestores de este caso de estudio.

Referencias

- Benavides, H., Simbaqueva, O., y Zapata, H. (2017). Atlas de Radiación Solar y UV de Colombia IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023775/RADIACION.pdf>
- Dev, S., Saha, S., Kurade, M. B., Salama, E. S., El-Dalatony, M. M., Ha, G. S., Chang, S. W., & Jeon, B. H. (2019). Perspective on anaerobic digestion for biomethanation in cold environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.034>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, 37(12), 2066–2070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- Ministerio de minas y Energía, Servicio Geológico Colombiano, & Motor de Integración de Información Geocientífica. (2000). Mapa Geotérmico de Colombia. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>