

DINÁMICA DE LA TEMPERATURA Y LA ALTURA EN PACAS BIODIGESTORAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS. ESTUDIO DE CASO EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR

Temperature and height dynamics in biodigester bales for organic waste recovery. A case study in a higher education institution

Elizabeth Carvajal-Flórez* y María Angélica Camargo Moreno

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Avenida 80 #65 – 223, Medellín-Colombia.

*Autora para correspondencia: ecarvajalf@unal.edu.co

(Recibido: enero 2026; aceptado: junio 2026)

Palabras clave: residuos orgánicos, gestión circular de residuos, valorización de residuos, sostenibilidad.

RESUMEN

La creciente generación de residuos sólidos en Medellín, Colombia, plantea retos significativos para su gestión sostenible. En el campus El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, se reportó en 2022 una producción diaria promedio de 509.22 kg de residuos sólidos, de los cuales 188.15 kg correspondieron a residuos orgánicos, con un 85 % destinado al compostaje. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad de las pacas biodigestoras como alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos. Se desarrolló un estudio cuasi experimental de carácter exploratorio con cuatro unidades experimentales, priorizando el monitoreo detallado de las variables. El análisis estadístico se basó en estadística descriptiva (media, desviación estándar) y correlación de Pearson. Se implementaron pacas con material vegetal, borra de café y residuos de alimentos, con dimensiones iniciales de 50 × 50 × 50 cm y relaciones 3:1 y 4:1. El análisis evidenció diferencias moderadas en el comportamiento térmico, con temperaturas promedio entre 35.9 °C y 39.7 °C, máximas entre 44.2 °C y 50.4 °C y mínimas homogéneas (22.3 a 23.8 °C). La altura inicial promedio fue de 49.6 cm, con valores finales entre 28.0 cm y 32.9 cm y una reducción promedio de 68.4 %. Se encontró una correlación positiva fuerte entre la altura y la temperatura, consistente entre las pacas. Se concluye que las pacas biodigestoras mostraron un comportamiento térmico y en altura compatible con procesos de biodegradación de residuos orgánicos, lo que respalda su aplicación como estrategia descentralizada de aprovechamiento de biomasa en instituciones de educación superior.

Key words: Organic waste, circular waste management, waste valorization, sustainability.

ABSTRACT

The increasing generation of solid waste in Medellín, Colombia, poses significant challenges for its sustainable management. At the El Volador campus of the Universidad Nacional de Colombia, Medellín, an average daily production of 509.22 kg of solid waste was reported in 2022, of which 188.15 kg corresponded to organic waste, with 85% allocated to composting. This study aimed to evaluate the viability of biodigester piles as an alternative for organic waste management. A quasi-experimental exploratory study was conducted using four experimental units, prioritizing detailed

monitoring of the variables. Statistical analysis was based on descriptive statistics (mean, standard deviation) and Pearson correlation. The piles were composed of plant material, coffee grounds, and food waste, with initial dimensions of $50 \times 50 \times 50$ cm and ratios of 3:1 and 4:1 (plant material:food waste). The analysis showed moderate differences in thermal behavior, with average temperatures ranging from 35.9 °C to 39.7 °C, maximum values between 44.2 °C and 50.4 °C, and relatively homogeneous minimum values (22.3 and 23.8 °C). The initial average height was 49.6 cm, with final values between 28.0 cm and 32.9 cm, corresponding to an average reduction of 68.4%. A strong positive correlation was found between height and temperature, consistent across the piles. It is concluded that biodigester bales exhibited thermal and height dynamics consistent with organic waste biodegradation processes, supporting their application as a decentralized biomass recovery strategy in higher education institutions.

INTRODUCCIÓN

Los residuos orgánicos provienen principalmente de restos de alimentos, así como de residuos vegetales generados por la poda y el corte de césped y de árboles. Estos pueden ser objeto de aprovechamiento, tratamiento o disposición final, dependiendo en gran medida de las decisiones del generador y de la capacidad de separación en la fuente (Vera-Loor et al. 2017, Manea et al. 2024). La disposición de estos residuos ya sea en rellenos sanitarios o en espacios abiertos sin tratamiento previo, genera impactos ambientales significativos, como la producción de lixiviados, la proliferación de vectores y la emisión de gases como el metano y el dióxido de carbono (Köfalusi y Aguilar 2006, Delgado Tacusi y Ríos Sierra 2021). Actualmente se busca aprovechar y transformar los residuos sólidos, reincorporándolos a los procesos productivos, no obstante, esto debe hacerse cumpliendo con criterios de viabilidad económica, técnica y ambiental, a fin de generar beneficios significativos (Andrade y Obiel 2022).

A nivel internacional, diversas tecnologías han sido evaluadas para el aprovechamiento de residuos orgánicos, entre ellas el compostaje, la digestión anaerobia y el vermicompostaje. Sin embargo, estas alternativas presentan limitaciones asociadas a requerimientos de infraestructura, control operativo y costos de implementación, especialmente en contextos institucionales o de pequeña escala. Estudios recientes señalan que, aunque estas tecnologías han sido ampliamente investigadas, aún existe una brecha en el desarrollo y evaluación de métodos alternativos de bajo costo, baja complejidad operativa y adaptables a condiciones locales que permitan una valorización eficiente de los residuos orgánicos dentro de esquemas de economía

circular (Diener et al. 2009, Suthar 2010, Cesaro y Belgiorio 2020).

En la ciudad de Medellín, la producción per cápita de residuos sólidos domiciliarios se proyectó estadísticamente en 0.56 kg/hab/d para el año 2023, en comparación con los 0.54 kg/hab/d proyectados en 2018, lo que evidencia un incremento en la generación de residuos (AM 2015, MCV 2018). En cuanto a los residuos orgánicos, en 2020 se estimó una generación de 1754.5 toneladas diarias (AM 2015) lo que subraya la necesidad de implementar estrategias eficientes de gestión y tratamiento.

Las instituciones educativas representan escenarios relevantes para la implementación de estrategias de aprovechamiento de residuos orgánicos, debido a la generación constante y la diversidad de sustratos producidos en restaurantes, cafeterías y áreas verdes. Estos espacios constituyen entornos adecuados para evaluar alternativas de tratamiento a escala piloto con potencial de replicabilidad en otros contextos institucionales. Estudios realizados en campus universitarios han señalado que los programas de compostaje y valorización de residuos de naturaleza orgánica funcionan como “laboratorios vivos”, donde es posible probar tecnologías a pequeña escala y generar información transferible a otros entornos similares (Torrijos et al. 2021). La Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, no escapa a esta tendencia creciente. En 2022, el campus El Volador registró una generación promedio de 509.22 kg/d de residuos sólidos no peligrosos, de los cuales 188.15 kg correspondieron a residuos orgánicos, es decir, 37 % del total diario (Carvajal Flórez et al. 2023). Esta cifra representa un incremento de 21 % respecto al porcentaje de residuos orgánicos reportado en 2016 por la Unidad de Gestión Ambiental (OGEA 2016). Según la caracterización de residuos realizada ese

mismo año, los residuos orgánicos generados diariamente incluyeron restos de alimentos (178.01 kg), borra de café o residuos de café molido gastado (7.04 kg) y material vegetal (3.10 kg). De este total, aproximadamente 85 % fue sometido a procesos de compostaje, de acuerdo con el informe del Sistema de Gestión Ambiental de la Sede.

No obstante, el proceso de compostaje no se mantiene de forma constante debido a fallas operativas. Como alternativa, se implementaron pacas biodigestoras, una técnica que permite la descomposición de la materia orgánica mediante la acción de agentes biológicos al aire libre y sobre el nivel del suelo (Ossa-Carrasquilla 2016a). Esta técnica aprovecha la exposición al ambiente externo para facilitar el intercambio natural de energía y materia, favoreciendo así la actividad microbiana. Su diseño estructural permite mantener condiciones internas estables de temperatura y humedad, lo que elimina la necesidad de remover el contenido para su oxigenación, haciendo del sistema un método autónomo (Ossa-Carrasquilla 2016b). Este método consiste en alternar y compactar capas de material vegetal y residuos de alimentos, eliminando al máximo la presencia de oxígeno (Díaz-Arteaga 2020). A esta técnica se le atribuyen ventajas como una instalación sencilla, operación accesible y la obtención de un abono de buena calidad (Ardila-Delgado et al. 2015).

El funcionamiento de las pacas biodigestoras depende de diversos factores ambientales y del manejo del sustrato, como la temperatura exterior e interna, el tipo de residuos orgánicos utilizados, el pH y el nivel de humedad. Estas condiciones influyen directamente en la velocidad del proceso de descomposición, que puede durar entre cuatro y ocho meses. El material resultante es un abono orgánico con alto contenido nutricional y con características físicas, químicas y biológicas adecuadas para mejorar la calidad de los suelos en espacios como jardines, zonas verdes o áreas agrícolas (Ardila-Delgado et al. 2015, Ossa-Carrasquilla 2016b).

En este contexto, se realizó el montaje de pacas biodigestoras con el objetivo de analizar la variación en la altura y la temperatura; la altura se considera un indicador del adecuado avance del proceso de digestión microbiana (Ossa-Carrasquilla 2016a, 2016b); y la temperatura, un factor clave en la actividad microbiológica (Martínez et al. 2016). Adicionalmente, se evaluó la viabilidad de esta técnica como alternativa para la gestión de residuos orgánicos en contextos institucionales, con el propósito de generar información que pueda ser replicable y transferible a otros escenarios con condiciones operativas similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el campus El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, donde la temperatura promedio es de 22 °C, con máximos que alcanzan los 28 °C al mediodía. La ciudad presenta dos temporadas principales de lluvia: de enero a junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre; durante estos periodos, la humedad relativa puede alcanzar hasta 73 %, según datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Hurtado Moreno et al. 2018).

Diseño del estudio y análisis estadístico

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuasi experimental de carácter exploratorio, orientado a analizar el comportamiento de variables físicas en pacas biodigestoras durante el proceso de descomposición de residuos sólidos de naturaleza orgánica. La investigación se basó en la implementación de cuatro unidades experimentales, seleccionadas en función de criterios operativos y de viabilidad para el monitoreo continuo de las variables de interés (altura y temperatura).

El tamaño de muestra estuvo determinado por las condiciones logísticas del estudio y por la naturaleza del sistema evaluado, priorizando el control y seguimiento detallado de cada unidad experimental sobre la representatividad estadística. Este enfoque es consistente con estudios a escala piloto en sistemas de tratamiento de residuos orgánicos, donde se busca identificar tendencias y patrones de comportamiento más que realizar inferencias poblacionales.

Para el análisis de los datos se empleó estadística descriptiva, incluyendo medidas de tendencia central (media), dispersión (desviación estándar) y correlación de Pearson entre variables, con el fin de caracterizar la dinámica del sistema y explorar la relación entre la temperatura y la altura de las pacas. Este tipo de análisis permitió describir el comportamiento temporal del proceso y establecer relaciones funcionales entre las variables evaluadas.

Fases del estudio

El montaje de las pacas biodigestoras se realizó a comienzos de agosto de 2022 y se mantuvo en funcionamiento hasta finales de noviembre del mismo año, bajo las condiciones climáticas previamente descritas. Durante este periodo se llevaron a cabo 20 mediciones de temperatura y altura con el fin de evaluar la dinámica del proceso de descomposición.

En una primera etapa, se diseñó el montaje experimental, definiendo la ubicación de las pacas, el tipo de residuos a emplear, así como sus dimensiones y cantidad. En la segunda etapa, correspondiente al montaje, se construyeron pacas con estructuras cúbicas de $50 \times 50 \times 50$ cm, no obstante, durante el proceso de conformación, la altura final de cada paca presentó variaciones, alcanzando valores superiores a los previstos. Estas diferencias se atribuyen a factores como la heterogeneidad del material, el grado de compactación, distribución interna de los residuos e irregularidad del terreno. En consecuencia, para el análisis se empleó la altura promedio medida en cada unidad experimental. La densidad de compactación osciló entre 0.7 y 0.9 kg/m³. La compactación del sustrato se realizó mediante un equipo manual que permitió prensar de manera uniforme la mezcla de residuos orgánicos. La mezcla estuvo compuesta por material vegetal seco (hojas, pasto y restos de poda) y residuos de alimentos (cáscaras de frutas, verduras y borra de café), excluyendo cualquier residuo cocido para evitar procesos de putrefacción no deseados; no se realizó trituración previa del material, lo que generó heterogeneidad en el tamaño de partículas y en la densidad aparente de las pacas.

La paca número 1 fue construida con una proporción volumétrica de 73 % de material vegetal y 27 % de residuos de alimentos (relación 3:1), con una masa total de 73 kg. En cambio, las pacas 2, 3 y 4 utilizaron una relación 4:1 (82 % material vegetal y 18 % residuos de alimentos), con una masa total de 56.8 kg cada una. El montaje experimental de las pacas se presenta en la figura 1. Esta modificación en la formulación respondió a observaciones preliminares de campo en el montaje del presente estudio, según las cuales un mayor contenido de residuos de alimentos comprometía la estabilidad estructural de la paca tras la compactación. En consecuencia, se incrementó la proporción de material vegetal en las

pacas subsiguientes para mejorar su integridad física y desempeño. El montaje experimental de las pacas se presenta en la **figura 1**.

La tercera etapa correspondió al monitoreo, el cual consistió en la recolección sistemática de datos de altura y temperatura. Las mediciones se realizaron al mediodía, a fin de reducir la variabilidad asociada a las fluctuaciones térmicas diurnas.

Es importante destacar que las mediciones se realizaron con mayor frecuencia durante las tres primeras semanas, dado que en este periodo suelen registrarse las mayores variaciones de altura por efecto del asentamiento y la descomposición inicial de los residuos (Ossa-Carrasquilla 2016a,b). La temperatura fue medida mediante un termómetro con sonda de 15 cm de longitud, introducida a dicha profundidad en el centro de cada paca para garantizar una lectura representativa del ambiente interno.

Para la medición de la altura se implementó un sistema de referencia compuesto por dos tubos verticales, graduados en centímetros y fijados firmemente al suelo en los extremos opuestos de cada paca. Esta configuración permitió realizar lecturas precisas y consistentes, minimizando el margen de error asociado a variaciones en la compactación del sustrato o a movimientos accidentales durante el seguimiento. De manera complementaria, se registró la presencia de organismos visibles como vectores, incluyendo moscas (como la mosca de la fruta), hormigas y hongos, con el propósito de identificar indicadores biológicos del estado de descomposición y de las diferentes fases del proceso.

RESULTADOS

En el **cuadro I** se pueden observar estadísticos descriptivos como son la media, máximo, mínimo,



Fig. 1. Montaje de las pacas biodigestoras : (a) acercamiento de una paca, (b) distribución de pacas.

CUADRO I. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS PARA CADA UNA DE LAS PACAS.

Estadísticos	Paca 1		Paca 2		Paca 3		Paca 4	
	Temperatura	Altura	Temperatura	Altura	Temperatura	Altura	Temperatura	Altura
Media	37.0	31.0	39.7	30.9	38.7	32.9	35.9	28.0
Mínimo	23.1	16	22.3	15.8	23.1	18	23.8	13
Máximo	44.2	50	50.4	48	49.3	56.5	45.4	44
Desviación estándar	7.7	10.1	10.4	9.6	9.0	11.1	5.7	9.4
Rango	18.9	31	25.3	29	23.3	37.2	16.5	26.8
Correlación de Pearson	0.80		0.87		0.89		0.92	

desviación estándar y correlación de Pearson, para las variables temperatura y altura de cada una de las pacas.

Variaciones en la temperatura

El análisis estadístico evidenció diferencias moderadas en el comportamiento térmico entre las pacas biodigestoras (**Fig. 2**). Con el fin de facilitar la interpretación del comportamiento térmico, se incorporaron los rangos de temperatura asociados a las fases microbianas reportadas para procesos de compostaje y biodegradación de residuos orgánicos.

La temperatura promedio osciló entre 35.9 °C y 39.7 °C, siendo la paca 2 la que presentó mayor actividad térmica, mientras que la paca 4 registró los valores más bajos, lo que indica menor variabilidad térmica. Las temperaturas máximas registradas oscilaron entre 44.2 °C y 50.4 °C, destacándose las pacas 2 y 3 por alcanzar los valores más altos, sugiriendo una mayor actividad microbiana durante las fases iniciales del proceso. Por otro lado, las temperaturas mínimas fueron relativamente homogéneas entre las pacas (22.3 a 23.8 °C), indicando condiciones de estabilización similares.

El rango térmico fue más amplio en las pacas 2 y 3, evidenciando una mayor variabilidad y dinamismo en el proceso de descomposición de los residuos sólidos, mientras que las pacas 1 y 4 presentaron un comportamiento más estable.

En el análisis comparativo de las pacas biodigestoras, se observa que la paca 1 no superó los 44.2 °C durante el periodo de seguimiento. En contraste, las pacas 2, 3 y 4 registraron temperaturas superiores a 45 °C en distintos momentos del proceso. A partir de la fase intermedia (aproximadamente desde la medición 13), se identifica una disminución progresiva de la temperatura en todas las pacas, con algunas variaciones en la magnitud y el ritmo de enfriamiento. En particular, la paca 4 presentó inicialmente temperaturas inferiores a las de la paca 1, pero posteriormente mostró un comportamiento térmico comparable o superior en las etapas siguientes del proceso.

Variaciones en la altura

Las pacas presentaron una altura inicial promedio de 49.6 cm. Al finalizar el periodo de monitoreo, los valores medios variaron entre 28.0 cm y 32.9 cm, evidenciando una reducción progresiva del volumen

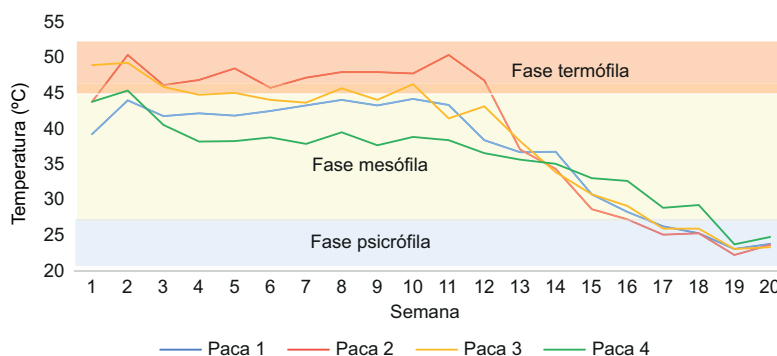


Fig. 2. Dinámica térmica de las pacas biodigestoras y rangos de temperatura asociados a las fases microbianas del proceso de biodegradación.

del material orgánico. La altura máxima de las pacas osciló entre 44 cm y 56.5 cm, siendo la paca 3 la de mayor valor inicial (**Fig. 3**).

En cuanto a la altura mínima, los valores se ubicaron entre 13 cm y 18 cm, destacándose la paca 4 por presentar la menor altura final. La altura promedio fue similar entre las pacas 1, 2 y 3 (31 a 33 cm), mientras que la paca 4 registró un valor inferior (28 cm). El rango de reducción fue mayor en la paca 3 (37.2 cm), indicando una mayor disminución del volumen a lo largo del proceso, en comparación con las demás unidades experimentales. La reducción porcentual de la altura osciló entre 67.1% y 70.5 %, con un promedio de 68.4 %. La paca 4 presentó la mayor disminución (70.5 %), mientras que las pacas 1, 2 y 3 mostraron valores similares, cercanos al 68 %. Estos resultados evidencian una reducción significativa del volumen en todas las unidades experimentales.

Desviación estándar

La desviación estándar de la temperatura presentó variaciones entre las pacas, con valores de 7.7 °C en

la paca 1, 10.4 °C en la paca 2, 9.0 °C en la paca 3 y 5.7 °C en la paca 4 (**Cuadro I**). Estos resultados indican una mayor dispersión térmica en las pacas 2 y 3, mientras que la paca 4 mostró un comportamiento más estable a lo largo del proceso. En cuanto a la altura, la desviación estándar osciló entre 9.4 cm y 11.1 cm, siendo la paca 3 la de mayor variabilidad (11.1 cm) y la paca 4 la de menor (9.4 cm), reflejando diferencias en la dinámica de reducción del volumen entre las unidades experimentales.

Dispersión de altura y la temperatura

La relación entre la altura y la temperatura (**Fig. 4**) mostró una tendencia positiva, evidenciada por la distribución ascendente de los puntos en la figura. Se observó una mayor concentración de datos en rangos intermedios de altura (30 a 45 cm) y temperatura (25 a 40 °C), mientras que en alturas superiores se presentó una mayor dispersión térmica. El patrón fue consistente entre las cuatro pacas, aunque con variaciones en la magnitud de los valores, lo que refleja diferencias en el comportamiento térmico entre las unidades experimentales.

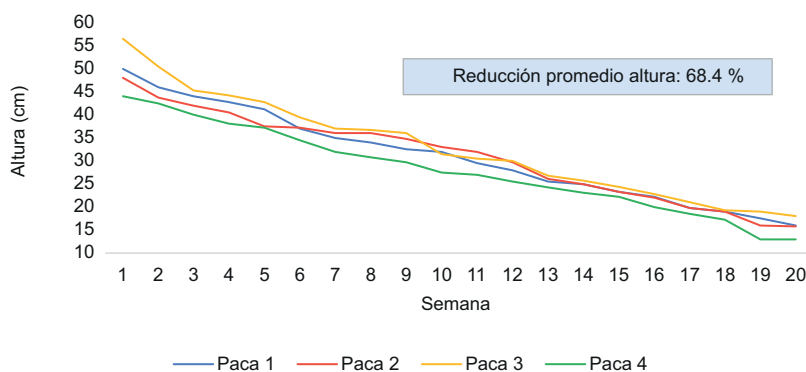


Fig. 3. Dinámica de reducción de la altura en las pacas biodigestoras durante el proceso de descomposición.

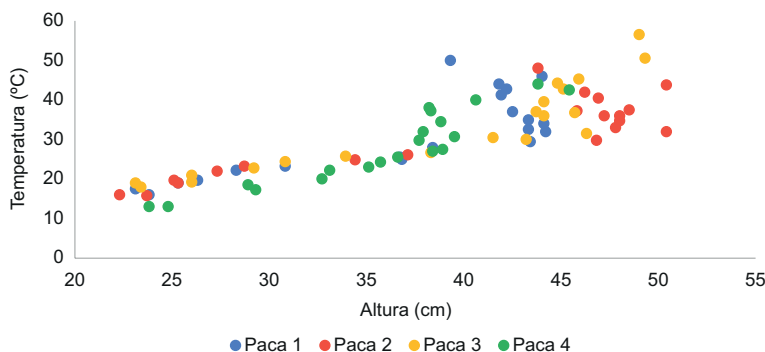


Fig. 4. Relación entre la temperatura y la altura en las pacas biodigestoras.

Coefficiente de correlación de Pearson

Los coeficientes de correlación de Pearson, presentados en el **cuadro I**, evidenciaron una relación positiva entre la altura y la temperatura en todas las pacas. Los valores obtenidos fueron de 0.80 para la paca 1, 0.87 para la paca 2, 0.89 para la paca 3 y 0.92 para la paca 4, indicando una asociación directa entre ambas variables en cada unidad experimental. A nivel global, el coeficiente de correlación fue de 0.861, confirmando una relación positiva consistente en el conjunto de los datos. Estos resultados reflejan una tendencia general en la que las mayores alturas se asocian con temperaturas más elevadas a lo largo del proceso.

Presencia de organismos

Se registró la presencia de individuos de la familia *Drosophilidae* (moscas de la fruta) desde el inicio del monitoreo (medición 1). Su abundancia aumentó en las primeras mediciones, alcanzando un pico alrededor de la medición 8, seguido de una disminución progresiva (medición 11) hasta su ausencia en la medición 14. Posteriormente, se observó una reaparición en las mediciones 15 y 16, para finalmente desaparecer nuevamente a partir de la medición 17.

También se observó en la paca 4 una gran actividad de hormigas hasta la medición 11, así como la aparición visible de hongos desde la medición 5. En contraste, las otras pacas presentaron escasa o nula presencia de estos organismos.

DISCUSIÓN

La técnica de pacas biodigestoras se caracteriza por favorecer un entorno predominantemente anaeróbico facultativo, ya que, aunque el interior de la paca experimenta una baja disponibilidad de oxígeno, no se alcanza una anoxia completa debido a su exposición parcial a las condiciones ambientales. Esta particularidad responde tanto a la estructura del sistema como al recubrimiento con material vegetal seco, que actúa como barrera física para el ingreso de oxígeno, manteniendo el calor y la humedad en el interior (Ardila-Delgado et al. 2015). La compactación del sustrato es otro factor determinante que reduce los poros de aireación y limita aún más el intercambio gaseoso, favoreciendo así la actividad de bacterias anaerobias que degradan la materia orgánica a través de rutas fermentativas y metanogénicas (Hobson y Wheatley 1993).

Estas condiciones influyen directamente en la dinámica térmica y estructural del sistema. Se sabe

que la temperatura en los sistemas anaeróbicos facultativos puede fluctuar considerablemente según la exposición solar, la humedad ambiental y la composición del residuo, afectando tanto la velocidad del proceso como la estabilidad del producto final (Bernal et al. 2009). Por ello, las mediciones de altura y temperatura en las pacas son indicadores clave para monitorear la evolución del proceso de descomposición, toda vez que permiten estimar los cambios físicos y la actividad biológica en función del entorno externo.

Las fases microbianas representadas en la **figura 2** fueron establecidas con base en los rangos térmicos reportados para procesos de compostaje y biodegradación de residuos orgánicos. En este contexto, el seguimiento térmico de las pacas biodigestoras permitió identificar las distintas fases microbianas involucradas en la descomposición de los residuos orgánicos.

Estas fases corresponden a rangos térmicos específicos asociados al predominio de distintos grupos microbianos: los psicrófilos (10 a 25 °C), mesófilos (25 a 40 °C) y termófilos (45 a 70 °C), cada uno con capacidades metabólicas diferenciadas que influyen en la velocidad y eficiencia del proceso (de Bertoldi et al. 1983, Bernal et al. 2009). La variación térmica observada en las pacas 2, 3 y 4 evidencia transiciones entre estas etapas, con comportamientos típicos de sistemas semiautónomos expuestos a condiciones ambientales abiertas.

Se observó que la paca 1 no alcanzó la fase termofílica, sugiriendo una menor intensidad de actividad biológica, posiblemente por compactación excesiva, escasa aireación o baja relación carbono/nitrógeno, factores que pueden limitar el ascenso de temperatura (Haug 2018). En contraste, las pacas 2, 3 y 4 sí lograron alcanzar temporalmente temperaturas propias de la fase termofílica, indicando una mayor degradación microbiana de la materia orgánica, fundamental para la eliminación de patógenos y la higienización del material resultante (Epstein 2017).

La disminución progresiva de la temperatura en todas las pacas se evidencia a partir de la fase intermedia del proceso, manteniéndose aún en rangos mesofílicos durante las mediciones 10 a 12. Posteriormente, en las mediciones finales, la temperatura desciende hasta valores cercanos a 25 °C y se estabiliza en niveles próximos a la temperatura ambiente, lo que indica la transición hacia la fase de maduración. Esta etapa se caracteriza por una menor actividad biológica y la transformación de compuestos orgánicos complejos en sustancias húmicas estables (Díaz et al. 2020). El seguimiento térmico detallado, por tanto,

no solo es consistente con la dinámica esperada del proceso, sino que permite establecer la cronología de las fases microbianas y, con ello, el grado de estabilidad del producto final.

Una posible explicación de la diferencia térmica desde el seguimiento 13 podría radicar en la composición del sustrato. La paca 1 presentó una menor proporción de material vegetal, lo cual puede haber limitado la disponibilidad de carbohidratos fácilmente degradables, como la celulosa y la hemicelulosa. Estos compuestos son metabolizados rápidamente por microorganismos durante las primeras fases de descomposición, liberando energía que se traduce en aumentos significativos de temperatura (Bernal et al. 2009).

Diversos estudios coinciden en que el contenido de residuos vegetales es crucial para alcanzar la etapa termofílica, pues son la principal fuente de carbono biodegradable necesaria para un desarrollo microbiano activo y sostenido (Haug 2018, Díaz et al. 2020). En consecuencia, la menor presencia de fracción vegetal en la paca 1 no solo afecta la intensidad del proceso de descomposición, sino que también reduce la eficiencia higienizante del sistema, ya que las temperaturas inferiores a 45 °C no garantizan la eliminación adecuada de patógenos (de Bertoldi et al. 1983). Estos hallazgos refuerzan la importancia de ajustar las proporciones de residuos orgánicos para asegurar condiciones térmicas óptimas y una maduración adecuada del compost.

Ahora bien, las bacterias que participan en la digestión anaeróbica están condicionadas principalmente por dos factores, que son la temperatura y la cantidad de materia orgánica (González Cabrera 2014, Corrales et al. 2015, Peñalosa Bernal 2022). De manera paralela, hay especies que participan en la descomposición de la materia orgánica y que pueden aparecer en determinadas etapas del proceso de descomposición, como es el caso de la familia Drosophilidae, que se relaciona con el proceso de fermentación, puesto que se alimentan de la levadura que crece en los frutos en descomposición (Quiceno Botero 2021).

La aparición de la mosca de la fruta en el sistema de pacas biodigestoras podría estar correlacionada con la fase fermentativa del proceso de descomposición, en la cual predominan bacterias como *Clostridium* sp. y *Lactobacillus* sp.

Estas especies son conocidas por su actividad en condiciones anaerobias o microaerofílicas, y por su capacidad de degradar materia orgánica en rangos de temperatura específicos. En particular, *Clostridium* sp. muestra actividad óptima tanto en rangos

mesofílicos (20 a 37 °C), como termofílicos (50 a 80 °C), mientras que *Lactobacillus* sp. se asocia mayormente con temperaturas entre 30 y 45 °C (Steel y Bert 2012, Haug 2018).

La observación de un aumento en la población de estas moscas hacia la medición 8 coincide con un pico de temperatura cercano a los 37 °C, valor que se encuentra dentro del rango de actividad microbiana mesofílica y, por tanto, de fermentación activa. La desaparición de esta especie desde la medición 17, cuando la temperatura interna se registró por debajo de los 20 °C, también sugiere una relación directa entre la presencia de ciertos insectos y las condiciones microbianas y térmicas del sistema. Este tipo de bioindicadores ha sido utilizado en estudios de compostaje para monitorear la evolución de las fases de descomposición y la eficiencia biológica del proceso (Tognetti et al. 2007, Steel y Bert 2012).

Con relación a la reducción de la altura, se refleja la pérdida de volumen asociada a la descomposición de la materia orgánica, lo que puede estar influenciado por factores como la composición del material, la compactación y la actividad microbiana (Barrington et al. 2002). Aunque la paca 3 presentó la mayor reducción absoluta de altura, la paca 4 registró la mayor reducción relativa. Esta diferencia se explica por la menor altura inicial de la paca 4, implicando que una disminución menor en términos absolutos representa una mayor proporción del volumen inicial. En este sentido, ambos indicadores son complementarios para evaluar la dinámica de reducción del material. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Epstein (2017), Haug (2018) y Flórez et al. (2024), quienes señalan que la mayor pérdida de volumen en procesos de compostaje ocurre en las dos primeras semanas, cuando se da la descomposición intensiva de materia orgánica fácilmente degradable, especialmente durante las fases mesofílica y termofílica.

Al finalizar el periodo de monitoreo, la reducción promedio de altura en las pacas fue de 68.4 %, superando los valores reportados en estudios similares (Velázquez-Cigarroa et al. 2017). Por ejemplo, Díaz-Arteaga (2020), describe reducciones superiores a 50 % en un periodo de seis meses como indicativo de maduración y estabilidad de materiales de producto de la descomposición de residuos. Por lo tanto, alcanzar esta magnitud de reducción en un periodo más corto podría sugerir, en una primera aproximación, que el sustrato ha alcanzado un nivel aceptable de descomposición y estabilidad biológica.

La reducción de altura también podría explicarse por la acción de organismos como las hormigas, que

cumplen un papel importante como fragmentadores primarios de residuos vegetales. Estos insectos facilitan el ingreso de microorganismos descomponedores al romper mecánicamente el material y, además, promueven el crecimiento de hongos simbióticos, acelerando así la mineralización del sustrato (Folgarait 1998, Arango Gutiérrez y Piedrahita Vera 2004, McGlynn y Poirson 2012, Quiceno Botero 2021).

La aparición de hongos en la paca 4 desde la medición 5, junto con la alta actividad de hormigas hasta la medición 11, sugiere condiciones particulares que favorecieron una mayor actividad biológica en comparación con las demás pacas. En los procesos de compostaje, los hongos desempeñan un papel clave en la degradación de compuestos orgánicos complejos, especialmente durante las fases de enfriamiento y maduración, donde participan activamente en la descomposición de materiales lignocelulósicos y en la estabilización de la materia orgánica.

En este sentido, la dinámica observada en la paca 4 podría indicar un estado más avanzado del proceso de descomposición o condiciones más favorables para la sucesión microbiana, lo cual concuerda con lo reportado por Hernández-Lara et al. (2022), quienes evidencian que la abundancia y diversidad de comunidades fúngicas están estrechamente relacionadas con las condiciones físicas y químicas del sistema, como la humedad, la aireación y la composición del sustrato. De manera complementaria, otros estudios han señalado que los hongos dominan en etapas donde los materiales más recalcitrantes requieren degradación especializada, reforzando su papel en la estabilización del compost (Insam y de Bertoldi 2007).

Asimismo, la presencia de hormigas puede estar asociada a su papel en la fragmentación del material y en la modificación de la estructura del sustrato, favoreciendo indirectamente la actividad microbiana. En contraste, la baja o nula presencia de estos organismos en las demás pacas sugiere condiciones óptimas para el desarrollo biológico, evidenciando la heterogeneidad del proceso de compostaje y la influencia de factores ambientales en la dinámica de descomposición.

La relación positiva observada entre la temperatura y la altura de las pacas biodigestoras, respaldada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0.861 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.74, indica que los mayores valores térmicos se presentan en etapas iniciales del proceso, cuando el sustrato conserva mayor volumen y disponibilidad de materia orgánica fácilmente degradable. El valor de R^2 sugiere que aproximadamente 74 % de la variabilidad

de la temperatura puede ser explicada por la altura, evidenciando una relación significativa entre ambas variables. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado, dado que la actividad microbiana impulsa el incremento térmico durante las fases mesofílica y termofílica, favoreciendo la degradación de compuestos orgánicos lábiles (Epstein 2017, Haug 2018, Chinakwe et al. 2019).

A medida que avanza el proceso, la disminución simultánea de la temperatura y la altura refleja la reducción de la actividad microbiana y la estabilización del sistema, características de la fase de maduración, en la cual se promueve la formación de compuestos húmicos más estables (Bernal et al. 2009, Fuentes et al. 2020). Del mismo modo, la consistencia del patrón observado entre las diferentes pacas sugiere condiciones operativas adecuadas y relativamente homogéneas para el desarrollo del proceso de biodegradación.

Este comportamiento es consistente con la variabilidad observada en las mediciones, donde las desviaciones estándar reflejan diferencias en la estabilidad térmica entre las pacas, sin alterar la tendencia general del proceso, lo cual ha sido reportado en estudios sobre compostaje que destacan la influencia de las condiciones operativas en la dinámica térmica y la estabilidad del sistema (Bernal et al. 2009, Azim et al. 2018).

Finalmente, se observaron otros indicadores de estabilidad del material, como la germinación de plantas, una humedad evidente al tacto (aunque no medida instrumentalmente), un color café oscuro característico de materiales orgánicos estabilizados y una textura gruesa, todos ellos criterios visuales mínimos que respaldan su potencial para el aprovechamiento y uso (Ossa Carrasquilla et al. 2020, Cajahuanca Condor y Espinoza Delgado 2022). En particular, el color oscuro se asocia con la formación de sustancias húmicas, mientras que la textura y la humedad se relacionan con la estructura física del material y la actividad microbiológica residual. La capacidad del compost para permitir la germinación es, además, un indicador biológico ampliamente utilizado para determinar la fitotoxicidad y el grado de madurez del sustrato, pues un compost inmaduro puede contener ácidos orgánicos y amoníaco libre que inhiben la germinación (Paredes et al. 2000).

En conjunto, los resultados son consistentes con la literatura sobre procesos de compostaje a pequeña escala, aunque limitados por la ausencia de análisis físicos y químicos; estos serán tenidos en cuenta en futuras investigaciones, toda vez que en la presente investigación no se tenía provisto dicho alcance. A

pesar de estas limitaciones, el estudio aporta evidencia experimental sobre el comportamiento de variables físicas en sistemas de pacas biodigestoras en contextos institucionales, reforzando su potencial como alternativa de gestión de residuos orgánicos de bajo costo.

CONCLUSIONES

La reducción de la altura observada en las pacas biodigestoras, con valores cercanos a 70 %, evidencia una disminución significativa del volumen del material a lo largo del proceso. No obstante, esta variable no puede considerarse un indicador directo de la tasa de descomposición, dado que puede estar influenciada por factores como la compactación y la heterogeneidad de los residuos sólidos usados. Por lo tanto, su uso se limita como un indicador de avance del proceso.

La dinámica térmica registrada permitió identificar el comportamiento típico de las fases del proceso de descomposición, caracterizado por valores elevados de temperatura en etapas iniciales y una disminución progresiva hacia condiciones más estables en las mediciones finales, lo cual es consistente con la reducción de la actividad microbiana a lo largo del tiempo.

La relación positiva entre la altura y la temperatura, evidenciada por un coeficiente de correlación de 0.861, así como por la tendencia observada en la gráfica de dispersión, indica una asociación entre ambas variables durante el proceso. Sin embargo, esta relación no implica causalidad directa, sino que refleja la evolución conjunta de las condiciones físicas y biológicas del sistema.

En conjunto, los resultados obtenidos a partir de las variables analizadas permiten aproximarse a la comprensión de la dinámica del proceso de descomposición en pacas biodigestoras; sin embargo, la ausencia de análisis físicos y químicos limita la evaluación de la calidad final del sustrato, por lo que su posible aplicación en suelos debe considerarse como una hipótesis que requiere validación experimental.

Finalmente, los resultados sugieren que la técnica de pacas biodigestoras constituye una alternativa viable para la reducción y aprovechamiento de residuos orgánicos *in situ*. Se recomienda, para estudios futuros, complementar el análisis con parámetros físicos, químicos (pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico, relación C/N, metales pesados) y microbiológicos, así como evaluar la calidad agronómica del producto final.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema de Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por facilitar los residuos sólidos utilizados para el montaje de las pacas biodigestoras, además de la información en la generación de residuos. Se utilizó ChatGPT (OpenAI) como apoyo para revisión de redacción y estilo lingüístico. Los autores revisaron y validaron íntegramente el contenido final.

REFERENCIAS

- AM (2015). Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio de Medellín. Alcaldía de Medellín. Medellín, Colombia, 818 pp.
- Andrade G. y Obiel N. (2022). Generación de biogás a partir de la degradación anaerobia de residuos orgánicos de cocina. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache. Veracruz, México, 31 pp.
- Arango Gutiérrez G.P. y Piedrahita Vera L.M. (2004). Mesofauna de las hormigas en el compost de la Corporación Universitaria Lasallista. Revista Lasallista de Investigación 1 (1), 22-26.
- Ardila-Delgado J.L., Cano Córdoba J., Silva Pérez G. y López Arango Y. (2015). Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios. Producción + limpieza 10 (2), 38-55.
- Azim K., Soudi B., Boukhari S., Perissol C., Roussos S. y Thami Alami I. (2018). Composting parameters and compost quality: A literature review. Organic Agriculture 8, 141-158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Barrington S., Choinière D., Trigui M. y Knight W. (2002). Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. Bioresource Technology 83(3), 189-194. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00229-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00229-2)
- Bernal M.P., Albuquerque J.A. y Moral R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. Bioresource Technology 100, 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Cajahuanca Condor S. y Espinoza Delgado S.L. (2022). Uso de abonos naturales elaborados a partir de residuos orgánicos para el mejoramiento de las tierras de cultivo: revisión sistemática. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad César Vallejo. Lima, Perú, 59 pp.
- Carvajal Flórez E., Abad Ramos K., Galeano Morelo M.J., Carvajal Moreno C. y Ogia Sofán J.D. (2023).

- Informe de caracterización de residuos sólidos campus El Volador, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Medellín, Colombia, 23 pp.
- Carvajal-Flórez E., Higueta K.S. y Rodríguez L.V.C. (2024). Pacas biodigestoras para la transformación de residuos orgánicos y material vegetal en una institución universitaria de educación superior. *Revista EIA* 21, 1-19. <https://doi.org/10.24050/reia.v21i41.1728>
- Cesaro A. y Belgiorno V. (2020). Ozone pretreatment for the anaerobic digestion of organic solid waste. *Detritus* 12, 51-56.
- Chinakwe E.C., Ibekwe V.I., Ofoh M.C., Nwogwugwu N.U., Adeleye S.A., Chinakwe P.O., Nwachukwu I.N. y Ihejirika C.E. (2019). Effect of temperature changes on the bacterial and fungal succession patterns during composting of some organic wastes in greenhouse. *Journal of Advances in Microbiology* 15, 1-10. <https://doi.org/10.9734/jamb/2019/v15i130075>
- Corrales L.C., Antolínez Romero D.M., Bohórquez Macías J.A. y Corredor Vargas A.M. (2015). Anaerobic bacteria: Processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet. *Revista Nova* 13(24), 55-82.
- de Bertoldi M., Vallini G. y Pera A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Management and Research* 1, 157-176
- Delgado Tacusi K.Y. y Rios Sierra C.M. (2021). Revisión sistemática: gestión de residuos orgánicos y su efecto en el ambiente 2021. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad César Vallejo. Lima, Perú, 70 pp.
- Díaz L.F., Golueke C.G., Savage G.M. y Eggerth L.L. (2020). *Composting and recycling municipal solid waste*. 1a ed. CRC Press. California, EUA, 318 pp. <https://doi.org/10.1201/9781315150444>
- Díaz-Arteaga A.I. (2020). Pacas biodigestoras Atardeceres VID como aporte a la economía circular. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia, 13 pp.
- Diener S., Zurbrugg C. y Tockner K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management and Research* 27, 603-610.
- Epstein E. (2017). *The science of composting*. 1a ed. CRC Press. School of Public Health, Boston University. Boston, EUA, 504 pp. <https://doi.org/10.1201/9780203736005>
- Folgarait P.J. (1998). Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review. *Biodiversity and Conservation* 7, 1221-1244. <https://doi.org/10.1023/A:1008891901953>
- Fuentes M., Baigorri R. y García-Mina J.M. (2020). Maturation in composting process, an incipient humification-like step as multivariate statistical analysis of spectroscopic data shows. *Environmental Research* 189, 109981. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109981>
- González Cabrera A.M. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. Tesis de Maestría. Departamento Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Sevilla. Sevilla, España, 99 pp.
- Haug R. (2018). *The practical handbook of compost engineering*. Routledge. Nueva York, EUA, 752pp. <https://doi.org/10.1201/9780203736234>
- Hernández-Lara A., Ros M., Cuartero J., Bustamante M.Á., Moral R., Andreu-Rodríguez F.J., Fernández J.A., Egea-Gilabert C. y Pascual J.A. (2022). Bacterial and fungal community dynamics during different stages of agro-industrial waste composting and its relationship with compost suppressiveness. *Science of The Total Environment* 805, 150330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150330>
- Hobson P.N. y Wheatley A.D. (1993). *Anaerobic digestion: Modern theory and practice*. Reino Unido, 278 pp.
- Hurtado Moreno G., Benavides H., Montealegre Bocanegra J., Ruiz Murcia J., Ortiz Royero J., Cadena M. y González O. (2018). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá, Colombia, 265 pp.
- Insam H. y de Bertoldi M. (2007). Microbiology of the composting process. En: *Waste management series* (L.F. Díaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, E. Stentiford, Eds.). Elsevier, pp. 25-48. [https://doi.org/10.1016/S1478-7482\(07\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80006-6)
- Köfalusi G.K. y Aguilar G.E. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica* 79, 39-51.
- Manea E.E., Bumbac C., Dinu L.R., Bumbac M. y Nicolescu C.M. (2024). Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: Current practices and potential improvements. *Sustainability* 16 (15), 6329, 2-25. <https://doi.org/10.3390/su16156329>
- Martínez S., Numpaque H. y Alvarado J. (2016). Efecto de la temperatura en la producción de biogás en un bioreactor tipo batch a través de la descomposición anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. *ENGI Revista Electrónica de la Facultad de Ingeniería* 3 (1), 1-19.
- McGlynn T.P. y Poirson E.K. (2012). Ants accelerate litter decomposition in a Costa Rican lowland tropical rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 28 (5), 437-443.
- MCV (2018). *Informe de calidad de vida de Medellín. Medellín como vamos*. Medellín, Colombia, 254 pp.
- OGEA (2016). *Plan de manejo integrado de residuos*. Oficina de Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín, Colombia, 250 pp.

- Ossa-Carrasquilla L.C. (2016a). Pacas biodigestoras: de los residuos al abono orgánico. *Revista Experimenta* (6), 26-29.
- Ossa-Carrasquilla L.C. (2016b). Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia, 98 pp.
- Ossa-Carrasquilla L.C., Correa-Ochoa M.A. y Múnera-Porras L.M. (2020). The biodigester bale as an organic waste treatment strategy: A bibliographic review. *Producción+ Limpia* 15, 71-91.
- Paredes C., Roig A., Bernal M.P., Sánchez-Monedero M.A. y Cegarra J. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biology and Fertility of Soils* 32, 222-227. <https://doi.org/10.1007/s003740000239>
- Peñalosa Bernal J.P. (2022). Evaluación del proceso de transformación de los residuos orgánicos a través de la paca biodigestora y su emisión de GEI, en cuatro zonas de vida ubicadas en el departamento de Antioquia en Colombia. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia, 65 pp.
- Quiceno Botero L.C. (2021). Macroinvertebrados asociados al proceso de digestión de la borra de café con residuos de alimento en pacas biodigestoras. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia, 40 pp.
- Steel H. y Bert W. (2012). Biodiversity of compost mesofauna and its potential as an indicator of the composting process status. *Dynamic Soil Dynamic Plant* 5, 45-50.
- Suthar S. (2010). Evidence of plant hormone like substances in vermiwash: An ecologically safe option of synthetic chemicals for sustainable farming. *Ecological Engineering* 36, 1089-1092. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.027>
- Tognetti C., Mazzarino M.J. y Laos F. (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology* 98, 1067-1076. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.04.025>
- Torrijos V., Dopico D.C. y Soto M. (2021). Integration of food waste composting and vegetable gardens in a university campus. *Journal Cleaner Production* 315, 128175. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128175>
- Velázquez-Cigarroa E., Ossa Carrasquilla L.C., Jarquín Sánchez N. y Victorino Ramírez L. (2017). Biodigester bales: Method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal* 2 (3).
- Vera-Loor J., Anchundia-Vélez G. y Sccipa-Mendoza M. (2017). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos de las frutas mediante digestión anaerobia: artículo de revisión. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada Yachasun* 1, 32-42.