



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 21/ Edición N.41
Enero - junio de 2024
Reia4108 pp. 1-19

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Carvajal Flórez, E.; Suárez Higueta, K. y
Clavijo Rodríguez, L. V.

Pacas Biodigestoras para la
Transformación de Residuos
Orgánicos y Material Vegetal en una
Institución Universitaria de Educación
Superior
Revista EIA, 21(41), Reia4108.
pp. 1-19.
<https://doi.org/10.24050/reia.v21i41.1728>

✉ *Autor de correspondencia:*

Ing Ambiental, MSc, Ph.D
Universidad Nacional de Colombia
Correo electrónico:
ecarvajalf@unal.edu.co

Recibido: 05-09-2023

Aceptado: 09-11-2023

Disponible online: 01-01-2024

Pacas Biodigestoras para la Transformación de Residuos Orgánicos y Material Vegetal en una Institución Universitaria de Educación Superior

✉ Elizabeth Carvajal Flórez¹

Kevin Suárez Higueta¹

Laura Valentina Clavijo Rodríguez¹

1. Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

Se presentan a continuación, los resultados de la investigación relacionada con la transformación de residuos orgánicos, a través de pacas biodigestoras. Se ensamblaron 5 pacas de aproximadamente 1m³ con los siguientes residuos: No0 (material vegetal), No1 (material vegetal+inóculo de compostaje), No2 (Material vegetal+génesis®), No3 (Material vegetal +estiércol de cabra), y No4 (material vegetal+ residuos de café). Estas se realizaron a través de un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido la oferta limitada de residuos en el tiempo de la investigación (Pandemia). Se construyeron con un sistema de compactación de 1t/m³ y fueron monitoreadas por 20 semanas, midiendo altura y temperatura; se tomaron muestras para determinar la composición fisicoquímica y organismos del material resultante. Se encontró que la paca No0 fue la que presentó mejor comportamiento en cuanto la altura seguido de la paca 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La paca No4 presentó mejor relación C/N, debido a las altas concentraciones de carbono orgánico del café. Se concluye que el material resultante no es un abono orgánico según la NTC 5167 de 2022, no obstante, la materia orgánica, elementos mayores y menores se encuentran en valores óptimos para ser catalogados como suelos para cultivos agrícolas.

Palabras Clave: residuos orgánicos, material vegetal, temperatura, altura, propiedades fisicoquímicas, abonos orgánicos, elementos mayores, elementos menores.

Biodigester Bales For Organic Waste And Plant Material Transformation In A University Institution Of Higher Education

ABSTRACT

The results of the research related to the transformation of organic waste of different nature, through biodigester bales, are presented below. 5 bales of approximately 1m³ were assembled with the following waste types: No0 (plant material), No1 (plant material+composting inoculum), No2 (plant material+Genesis®), No3 (plant material+goat manure), and No4 (plant material+coffee waste). The bales were made through non-probability sampling for convenience, because limited supply of waste at the time of the investigation (Pandemic). They were built with a 1t/m³ compaction system and monitored for 20 weeks, measuring height and temperature. Prior to its disassembly, samples were taken to determine the physicochemical composition, and organisms present. It was found that bale No. 0 was the one that presented the best behavior in terms of height, followed by bales 1, 2, 3, and 4, respectively. Bale No. 4 presented a better C/N ratio due to the high concentrations of organic carbon in coffee. It is concluded that the resulting material cannot be classified as organic fertilizer according to NTC 5167 of 2022, because not all the parameters comply. However, organic matter and major and minor elements are at optimal values to be classified as soils for agricultural crops.

Keywords: organic waste, plant material, temperature, height, physicochemical properties, physicochemical properties, organic fertilizers, major elements, minor elements.

1. Introducción

Las instituciones de educación superior se constituyen en una fuente importante de generación de residuos dado las dinámicas que allí se presentan (Coyago et al., 2016). La Sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia, es un espacio donde confluyen actividades académicas, investigativas y administrativas, motivo por lo cual, conducen a la generación de residuos orgánicos de

diferente naturaleza, dentro de los cuales están los de las cafeterías y restaurantes, estiércoles debido a las actividades académicas (prácticas con cabras en el Programa de Zootecnia) y material vegetal de zonas verdes y jardines.

De acuerdo con los datos de la última caracterización de residuos sólidos del campus El Volador del 2022, se generan 1317,1 kg/sem de residuos orgánicos producto de los servicios de alimentación de cafeterías y restaurantes (Carvajal Flórez et al., 2023). No se dispone información de la cantidad de material vegetal y de estiércoles. Actualmente muchos de estos residuos orgánicos son aprovechados a través de un sistema de compostaje aerobio, sin embargo, se han tenido algunas dificultades técnicas y económicas en el proceso. Es por esto que, la Unidad de Gestión Ambiental de la Sede, en compañía de una docente y estudiantes del programa de ingeniería ambiental, decidieron estudiar la técnica de pacas biodigestoras como un sistema alternativo al sistema de compostaje que actualmente se desarrolla.

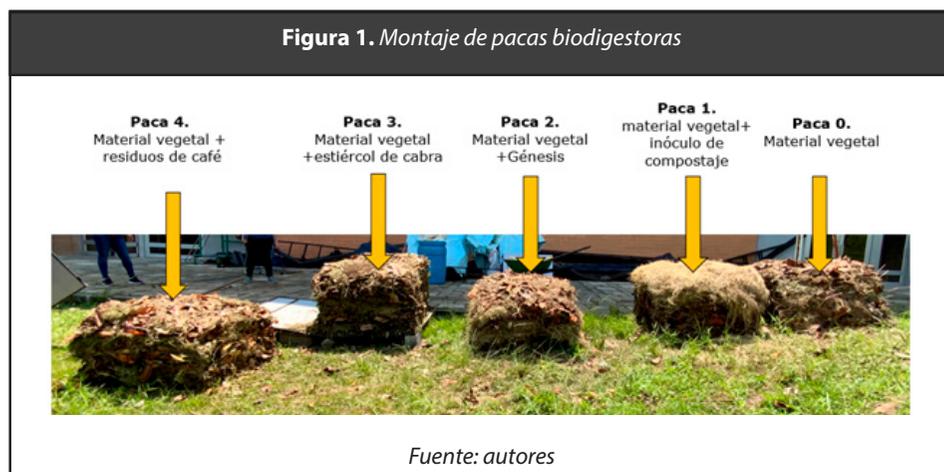
Las pacas biodigestoras (En adelante PB), se constituyen en una técnica implementada recurrentemente por grandes generadores como son las plazas de mercado, unidades residenciales, instituciones educativas, centros comerciales, entre otros, para el aprovechamiento y transformación de residuos orgánicos de diferente tipo, no obstante, no se dispone de información técnica y académica escrita y documentada, que dé cuenta del principio de funcionamiento de dicho proceso (Esfera Viva, 2017; Ossa Carrasquilla, 2016). De acuerdo con (Carrasquilla, 2016) una PB es un microecosistema vivo, que se conforma a la intemperie, bajo condiciones ambientales y directamente en el suelo, de tal manera que ocurran transformaciones bioquímicas y descomposición de materia orgánica, a través de micro, meso y macroorganismos. La PB se realiza bajo compactación, de tal manera que las concentraciones de oxígeno sean limitadas o mínimas; la digestión de la materia orgánica se presenta bajo condiciones anaeróbicas no estrictas, favoreciéndose el desarrollo de microorganismos anaerobios facultativos, que se adaptan a la presencia y ausencia de oxígeno, que no es usado para su crecimiento ni obtención de energía, sin embargo, este no les es tóxico (Ossa Carrasquilla, 2016).

Las PB están condicionadas por parámetros como la temperatura ambiental y del interior del sustrato, tipo de materiales usados, pH, humedad, entre otros, los cuales permiten que los residuos orgánicos se descompongan en periodos muy variables, que oscilan entre 4 y 8 meses. El producto final de las PB, se constituye en un material rico en nutrientes y con propiedades químicas, físicas y biológicas necesarias para ser usadas en suelos, zonas verdes, jardines, entre otros (Ardila Delgado et al., 2015).

En virtud de lo anterior, se estudió el comportamiento de las PB conformadas con diferentes sustratos (material vegetal y residuos orgánicos), con el propósito de evaluar su conveniencia y posibilidad de implementación a escala real en los campus universitarios. Para tal fin, se realizó el monitoreo de parámetros como temperatura y altura durante 20 semanas, además de conocer sus características y propiedades fisicoquímicas determinando la conveniencia de su uso en suelos y jardines de la Sede a escala real.

2. Materiales y Métodos

Se hizo el montaje de 5 PB con un volumen aproximado de 1m³ cada una, en el campus El Volador de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Las pacas se conformaron con material vegetal y residuos orgánicos de diferente naturaleza, así: paca No 0, compuesta sólo por material vegetal, paca No 1 por material vegetal e inóculo de compostaje, paca No 2 por material vegetal y acelerador de descomposición llamando Génesis®, paca No 3 por material vegetal y estiércol de cabra (proveniente del aprisco del programa de zootecnia), y paca No 5 por material vegetal y residuos de café (Figura 1).



En todas las PB se usó material generado en las actividades de jardinería de la universidad, entre los que principalmente se destaca césped y hojarasca. El inóculo de compostaje incorporado en la paca No1, corresponde a un material maduro y estabilizado, conformado por frutas (pepas) de mango, huesos, tusas de maíz, entre otros. Con relación al producto Genesis ® de la paca No2, es una mezcla de ácidos húmicos y fúlvicos con elementos mayores, microelementos y vitaminas; contiene bacterias (celulíticas y antagonistas), hongos (actinomicetos, entomopatógenos y antagonistas) y levadura (Hoyos et al., 2008). Este líquido se aplicó siguiendo las recomendaciones del productor, por lo tanto, se hizo una dosificación en una relación 1/10, es decir, 10 ml del producto por un litro de agua. Esta dosificación se aplicó por cada 10 cm de altura de la paca.

Las cantidades de material y vegetal y los diferentes tipos de residuos usados para el montaje de las PB, se presentan en la Tabla 1.

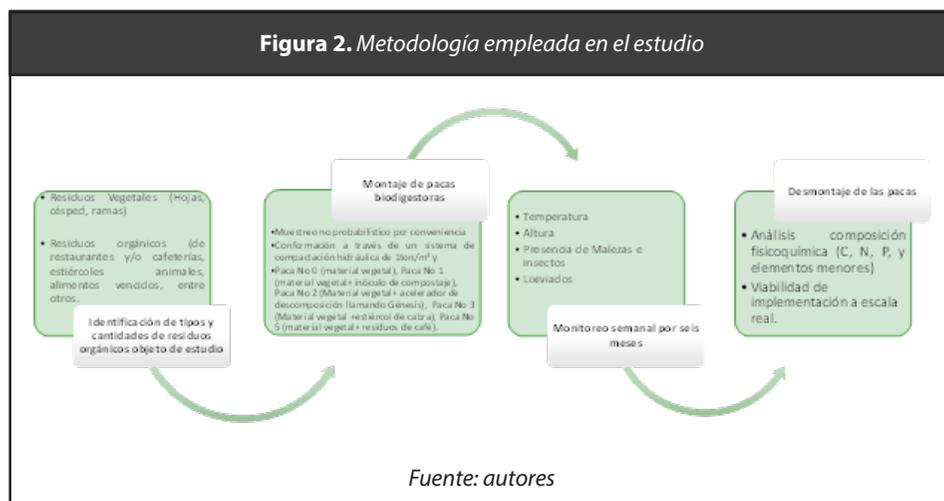
Tabla 1. Tipos y cantidades de residuos sólidos que se usaron en las pacas biodigestoras

No Paca	Césped	Hojarasca	Inóculo	Génesis	Caprinaza	Borra de café	Volumen total (L)
0	940	30	0	0	0	0	970
1	880	30	65	0	0	0	975
2	940	30	0	0,01	0	0	970,01
3	680	30	0	0	260	0	970
4	850	30	0	0	0	90	970

Fuente: Autores.

El estudio se realizó a través de un muestreo no probabilístico por conveniencia, dadas las características de los residuos y la oferta limitada de los mismos en el tiempo de la investigación (Pandemia), toda vez que se suspendieron las actividades académicas, disminuyendo por tanto la generación de residuos sólidos en los campus. Estas fueron compactadas con un sistema hidráulico de 1 ton/m³ y se le hizo seguimiento semanal de variables como altura y temperatura por un lapso de 20 semanas.

Previo al desmontaje de las PC, se tomaron muestras del material resultante para determinar su composición fisicoquímica analizando parámetros como pH, % de humedad, materia orgánica (MO), Carbono orgánico (CO), Nitrógeno total (N), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Sodio (Na), Fósforo (P), Azufre (S), hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Boro (B), los cuales fueron realizados por el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Sede Medellín. Los resultados se socializaron con las dependencias de la sede correspondiente, para que éstas determinen la viabilidad de implementar las pacas biodigestoras a escala real. En la Figura 2 se presenta un resumen de la metodología empleada.

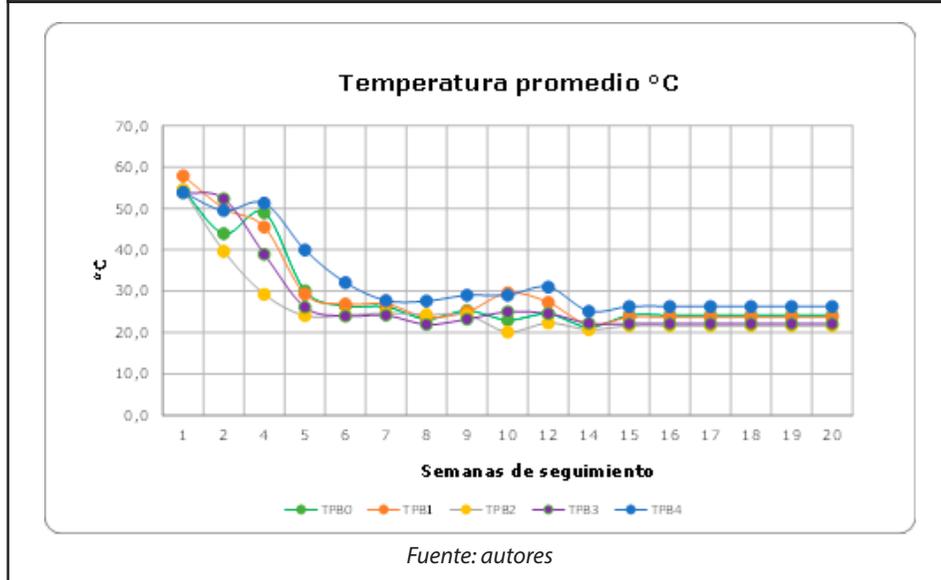


3. Resultados y discusión

3.1. Seguimiento a temperatura

La Figura 3, presenta el comportamiento de las pacas biodigestoras, en el tiempo durante el cual se le hizo seguimiento y monitoreo. De allí se puede deducir que las temperaturas máximas promedio son de 57°C y las temperaturas mínimas promedio son de 20°C. La paca No 4 presentó la mayor temperatura promedio con 35.1°C y la paca No 2, presentó la menor temperatura promedio con 27,2°C. Dichas temperaturas promedio pueden dar cuenta del proceso de descomposición anaeróbica (Tapia Mena, 2010), mostrando temperaturas en las que hay presencia de organismos psicrófilos, los cuales se adaptan a temperaturas entre 10 a los 25°C, la etapa mesófila desde los 25°C hasta las 40°C y la etapa termófila desde los 49°C hasta los 70°C.

Figura 3. Temperatura promedio pacas biodigestoras



También se encontró que durante las 4 primeras semanas la temperatura estuvo por encima de los 40 °C para la mayoría de las pacas, por consiguiente, se indica el inicio del proceso de descomposición de la materia orgánica presente en los residuos, sin embargo, dichas temperaturas se encuentran por debajo de las que se presentan en la fase mesófila, en la descomposición aerobia, las cuales alcanzan valores entre 50 y 70°C (Salazar Arce, 2016). Luego, la temperatura comienza a descender en la semana 5 en todas las pacas, alcanzando valores entre 25°C y 40°C, indicando una etapa termófila. Finalmente, la temperatura se estabiliza a partir de la semana 11, denotando una etapa de enfriamiento y maduración, con temperaturas entre los 25°C y 20°C, hasta la semana 20. Las temperaturas que se presentaron son menores a las que se presentan en un proceso de descomposición aerobia, esto debido a la deficiencia en las concentraciones de oxígeno a lo largo de la paca, toda vez que estas no son movidas o volteadas recurrentemente, como se hace en el compostaje convencional; además, la compactación ejercida en su montaje, hace que haya menos espacios libres para la transferencia de oxígeno al interior de la misma, razón por la cual la descomposición se ralentiza y las temperaturas alcanzadas, son mucho menores a las que se presentan en la fase mesofílica y termofílica aeróbica. (Ossa Carrasquilla, 2016), menciona en su tesis de pacas biodigestoras para

el tratamiento biológico de residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia que, la degradación de este tipo de procesos se da al inicio a temperatura ambiente y luego tiende a aumentar por la presencia de microorganismos. Además, relaciona que se presentan tres rangos de temperatura en condiciones anaeróbicos así: inferior a 25°C con presencia organismos psicrófilos, rangos entre 25 y 45°C para los mesófilos y entre 45 y 65°C en el caso de los termófilos, temperaturas muy similares a las presentadas en esta investigación.

Los resultados del presente estudio son medianamente diferentes a los de la investigación de descomposición de residuos orgánicos en pacas de (Ardila Delgado et al., 2015); allí se menciona que la fase mesofílica se presentó en temperaturas entre 27°C y 34°C y la termofílica a temperaturas entre 54°C y 57°C. Es de aclarar que estas pacas fueron elaboradas con estiércoles de diferentes heces de animales, entre ellos de cabra, como es el caso de la paca No 3 de la presente investigación. Las diferencias de temperaturas podrían obedecer al instrumento usado en la toma de temperatura, toda vez que el termómetro usado tenía un punzón de aproximadamente 25 cm, por consiguiente, no llegaba al centro de la paca, como se hizo con el caso del estudio de (Ardila Delgado et al., 2015).

Al medir la temperatura en la parte superior de la PB, puede incidir a que los valores de ésta sean un poco más altos, debido a la transferencia de oxígeno y tener contacto con parámetros ambientales como radiación solar, viento, y humedad; mientras que, al medir en el centro de la PB, puede favorecerse una menor temperatura debido al poco contacto de los residuos con los parámetros ambientales. Otro estudio relacionado con la descomposición de residuos, en el que se evaluaron cambios de materiales orgánicos en función de su ubicación a través de perfil del suelo, menciona que, la temperatura favorece la actividad biológica, la cual se conserva al interior del perfil, ayudando a la actividad metabólica de los microorganismos. Se establece que, los residuos que se encuentran en la superficie del suelo, interactúan directamente con la temperatura, por lo tanto, presentan menor humedad, lo que conduce a menor actividad de los organismos en comparación con la que ocurre al interior del perfil del suelo (Correa et al., 2020); esta premisa corrobora lo expuesto anteriormente

frente a que, en la parte superior de las pacas, las temperaturas son levemente mayores que en el centro o en la parte inferior de las mismas, debido a la menor humedad y actividad microbiana.

3.2. Seguimiento a altura

En la Tabla 2 se puede apreciar la variación y la tasa de cambio de la altura en el tiempo de seguimiento de las PB. Se puede deducir que, los más grandes cambios de altura se presentaron antes de la semana 10, luego de esto, las alturas tienen unos mínimos cambios o cambios imperceptibles. Esto podría obedecer a que metabólicamente en las primeras semanas el proceso se activó debido a la gran disponibilidad de alimento para los microorganismos, luego, la materia orgánica carbonácea se oxida en CO_2 y el nitrógeno se transforma en nitratos, ralentizando el proceso y generando cambios mínimos en la altura de las PB (Agreda and Deza, 2010).

Tabla 2. Comportamiento de la altura en función del tiempo

No de la paca	Altura inicial	Altura Final	Tasa de cambio
0	84	25	70,4%
1	72	24	66,7%
2	59	20	66,1%
3	70	28	60,0%
4	58	33	56,9%

Fuente: Autores.

De las PB, la que mayor disminución en la altura tuvo fue la paca No 0, debido a que la tasa de cambio fue del 70,4%, seguido de la paca No 1 con el 66,7%, luego la paca No 2 con 66,1%, la paca No 3 con 60%, y finalmente la paca No 4 con 56,6%. Se destaca que la paca No 0, sólo estaba compuesta de material vegetal, cuya composición principal es nitrógeno. Este compuesto está presente en aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos, el cual es sintetizado por los microorganismos, y cuando hay abundancia de éste, se genera mayor

presencia de bacterias y por ende la aceleración en la descomposición de la materia orgánica (Ossa Carrasquilla, 2016; Sanchez Gonzales, 2015; Sánchez-Monedero et al., 2001). Los microorganismos usan el nitrógeno para sintetizar proteínas conjuntamente con otros productos químicos; un exceso de este nutriente ocasiona un aumento de bacterias y por ende activar la descomposición de la materia orgánica, tal como se presenta en las PB (Dios Pérez, 2009).

Por las razones previamente expuestas, puede afirmarse que la PB No 0 elaborada sólo con material vegetal presentó una tasa de cambio mayor en comparación con las demás PB, sumado a factores exógenos que también condicionan la descomposición del material, como es el caso de la temperatura, humedad, transferencia de oxígeno, entre otros factores. Las concentraciones de nitrógeno de la PB No 0 se pueden ver en la (Tabla 3). La PB No 1, también tuvo una tasa de cambio destacable, debido a que la presencia de material vegetal e inóculo de compostaje (material maduro, con buena presencia de carbono (Tabla 3), logrando un balance entre el carbono y el nitrógeno, para generar una tasa de composición de la materia orgánica adecuada y por ende una tasa de cambio en altura considerable.

En términos generales puede establecerse que el comportamiento de todas las PB fue favorable, debido a que presentaron tasas de cambio en altura superiores al 50%, lo cual indica que se presentó una descomposición apropiada del material con el cual se elaboraron (Residuos orgánicos y material vegetal). Esta situación es consistente con lo mencionado por (Peñalosa Bernal, 2022) en su trabajo de grado, en el cual se presentan tasas de cambio en alturas que oscilan entre el 60 y 70%, evidenciando que la altura es un indicativo visual que favorece la descomposición de los residuos con el paso del tiempo, y cuando las PB se reducen a la mitad o un poco menos, se tienen condiciones óptimas de humedad, generando un abono de buenas condiciones.

3.3. Composición física y organismos del material resultante

En la semana 20 se realizó una inspección visual del material resultante de las PB para conocer su composición física y tomar muestras que permitieran analizarlas fisicoquímicamente. Se encontró que la PB que menor descomposición mostraba fue la No 2 y 3, en especial la No 2, dado que los materiales seguían casi que intactos en la parte inferior de esta. Visualmente se evidenció que en el fondo de las PB quedaba hojarasca por descomponer y el crecimiento de vegetación en la parte superior de éstas para la semana 20. En la paca No 3 se encontró caprinaza que conservaba su forma; es de aclarar que la caprinaza usada no era 100% fresca, es decir, ya había iniciado un proceso de descomposición en el montaje de los ensayos experimentales, y que, además, esta paca era la única que no tenía contacto con el suelo, imposibilitándole la interacción directa con los microorganismos y la humedad disponible del éste.

En la Figura 4, se evidencian algunas propiedades físicas del material resultante de las PB. Acorde a los métodos de campo sugeridos por la FAO para determinar las propiedades físicas de los suelos (FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2009), se puede inferir que, el material resultante de las PB tiene alta presencia de materia orgánica debido a su color marrón oscuro y humedad media-alta. En cuanto a la textura, se encontró que tiene buena cohesión y comprensión, considerándose como una arcilla ligera, además de presentar una consistencia muy plástica. En el estudio de (Peñalosa Bernal, 2022), se relata que, un color marrón, y una textura y olor parecido a la tierra de capote, puede indicar que el material cumple con propiedades para ser catalogado como abono, premisa que corrobora las condiciones favorables de las propiedades físicas del material resultante de las PB.

También se detectó en la Paca No0 presencia de hormigas, lo cual podría relacionarse con los altos contenidos de nitrógeno, tal como se relató previamente. En el centro de todas las pacas se encontraron cochinillas de humedad (Osnícideos) y lombriz roja californiana (*Eisenia Foetida*), comprobándose entonces condiciones favorables (humedad y materia orgánica) para la presencia de

dichos organismos y la abundancia de alimento disponible para su reproducción y alimentación (Ardila Delgado et al., 2015).



3.4. Propiedades químicas del material resultante

La Tabla 3, presenta los valores de diferentes parámetros químicos medidos a cada una de las PB. Se destaca que el pH tiende a ser neutro en la mayoría de las PB, a excepción de la PB No 3, que al ser elaborada con heces de cabra tiende a ser más alcalina debido al tipo de alimentación que ellas consumen y a la presencia de compuestos como el nitrógeno en forma amoniacal (Tortosa, 2013).

Tabla 3. Propiedades químicas del material resultante de las PB

Parámetro	Paca No 0	Paca No 1	Paca No2	Paca No 3	Paca No 4	Unidad
pH	7,0	6,7	8,2	7,8	7,6	%
MO	23,91	19,98	27,29	25,32	58,81	
CO	10,61	8,81	10,02	10,92	24,71	
N	2,03	1,80	2,23	2,32	2,18	
C/N	5,2	4,9	4,5	4,7	11,3	cmol/kg
Ca	35,96	35,55	39,34	41,15	13,61	
Mg	17,45	13,38	26,56	21,06	10,84	
K	4,39	4,86	25,94	15,62	58,86	
Na	0,06	0,66	3,26	0,22	21,07	

Parámetro	Paca No 0	Paca No 1	Paca No2	Paca No 3	Paca No 4	Unidad
P	233,51	401,97	489,87	247,32	485,09	mg/kg o ppm
S	37,95	44,83	727,86	241,17	423,89	
Fe	28,85	45,54	24,28	30,27	16,09	
Mn	17,87	23,82	24,26	30,27	27,85	
Cu	1,19	1,25	3,39	3,42	0,6	
Zn	43,62	53,76	66,97	24,40	54,69	
B	7,49	6,82	9,43	8,54	3,99	

El contenido de materia orgánica (%) de mayor a menor valor es de 58,81; 25,32; 23,91; 21,29 y 19,98 % para la paca No 4, No 3, No 0, No 2 y No 1, respectivamente. Dichos valores se encuentran por encima de 10%, categorizándose como un valor alto, según los estándares generales para clasificar los suelos con fines agrícolas (Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo SCCS and Morales, 2010). Para el carbono orgánico, el mayor valor lo representa la PB No4. Este valor es consistente con las propiedades del café reportadas en diferentes publicaciones, ya que se caracteriza por la presencia de carbono en diferentes grupos funcionales, como son los hidroxílicos, carboxílicos y fenólicos, así como en la lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en el grano de café y sus derivados (Carvajal-Flórez and Giraldo, 2020; Gómez, 2010; ROA et al., 1999; Suarez, 2012). De otro lado, la NTC 5167 (ICONTEC, 2022), la cual establece los parámetros de los productos orgánicos para ser usados como abonos, menciona que, el carbono orgánico debe ser mínimo del 15% para que el producto sea considerado abono orgánico, por lo tanto, la única PB que cumpliría dicha norma es la No 4. Para el nitrógeno, la norma menciona que debe ser mayor al 1%, situación que en todos los casos de las PB se cumple. Para la relación C/N, se encontraron valores entre 4.7 y 11.3. Según (Jaramillo Jaramillo, 2002), un valor mayor o igual a 10 para suelos, significa alta biodegradabilidad que se ve controlada por la actividad de los microorganismos y la facilidad con que se puede descomponer la materia orgánica. La relación C/N óptima de los materiales al inicio del compostaje debe ser debe ser entre 25 y 30, según (Bueno et al., 2008; Ríos Escobar, 2016) debido

a que los materiales son descompuestos o sintetizados por los microorganismos; luego, en la fase de maduración, la relación C/N óptima es de 10, valor similar al humus. Como lo menciona (Márquez et al., 2008), un material es suficientemente estable y maduro cuando la relación C/N es <20 . Por las anteriores referencias, se concluye que, la relación C/N de las PB no satisface los valores para suelos o compostajes maduros, toda vez que los valores son inferiores a 10, a excepción de la paca No 4, cuyo valor fue 11.3, debido que el valor del carbono es el más alto en todas las PB.

En cuanto a los elementos mayores como Ca, Mg, Na y K, según los estándares generales para clasificar los suelos con fines agrícolas (Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo SCCS and Morales, 2010) las concentraciones en cmol/kg en la categoría alta son: Ca debe ser >6 , el Mg >6 , el Na >0.5 y el K entre 0.6 y 1. En el caso del Ca todas las PB cumplen ya los valores están entre 13,61 y 41,15. El Mg está entre 10,8 y 26,6, es decir que todas las PB cumplen. El Na en las PB está entre 0.06 y 21.07, es decir que cumplen las PB de la 1 a la 4, ya que la paca No 0 está por debajo del rango permitido. Finalmente, el K oscila entre 4,4 y 56,9, lo que significa que todas las PB están por fuera del rango permitido.

Para elementos menores, la (Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo SCCS and Morales, 2010), establece los siguientes valores en la categoría alta: B >0.6 , Mn >10 , Cu >4 , Zn >6 y Fe >100 , todos en unidades de ppm. Contrastando estos valores, con los presentados en la Tabla 3, se puede deducir que, para el B, Mn y el Zn, cumplen en todos los casos, pero esto no sucede con el Cu y el Fe, que se encuentran por debajo de los límites permisibles. El P debe ser >40 , por lo tanto, se cumple debido a que todas las PB están por encima de los 200ppm.

De manera general, y comparando el comportamiento de cada una de las PB, la que tuvo mejores resultados frente a parámetros fisicoquímicos, fue la No 4, conformada por café. Como se mencionó previamente, las propiedades del café generaron propiedades favorables para mayor presencia de carbono, relación C/N y de elementos menores. La PB No2 a pesar de contar con un acelerador de descomposición de materia orgánica (Genesis ®), no tuvo un comportamiento destacable. Se presume que el Genesis ®, al

ser líquido, fácilmente se lava por el efecto de la lluvia, toda vez que se registraron niveles de precipitación altos en el periodo de seguimiento de la investigación. La PB No 0 se destacó en mayor reducción en altura con lo que se prevé que el material de la que estaba compuesta, además de las condiciones ambientales, favoreció mayor tasa de cambio. La PB No1 no tuvo incidencia en la presencia de material maduro de compostaje, debido a que tuvo un comportamiento muy similar a la PB No0. Finalmente, la PB No 3, conformada por caprinaza, constata que los estiércoles son residuos agrícolas idóneos para el compostaje, debido a las altas concentraciones nitrógeno, especialmente inorgánico, y por sirven inoculantes microbianos (Tortosa, 2013).

4. Conclusiones

Se encontró que la paca 0 fue la que presentó la mayor tasa de disminución en cuanto la altura final, seguido de la paca 1, 2,3 y 4, respectivamente. Se observó que, en ésta, el material vegetal se descompuso considerablemente a pesar de que solo tenía césped y hojarasca.

Las temperaturas máximas promedio son de 57°C y las mínimas promedio de 20°C. La paca No 4 presentó la mayor temperatura promedio con 35.1°C y la paca No 2, presentó la menor temperatura promedio con 27,2°C.

Con relación a la relación C/N, se evidenció que los valores fueron 5,2; 4,9; 4,5; 4,7 y 11,3 para la paca 0, 1, 2, 3 y 4, respectivamente, indicando que la paca con café presenta mayor biodegradabilidad debido a la mayor presencia de carbono, en comparación del nitrógeno.

En la paca PB No 4 se observa una buena cantidad de material orgánico descompuesto (por su color marrón) y por la alta presencia de lombrices y otros insectos, además, de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, es la que mejor comportamiento presenta según los estándares generales para clasificar los suelos con fines agrícolas.

Las pacas biodigestoras son una técnica versátil, económica y de alto nivel de eficiencia para el tratamiento de residuos de tipo orgánicos, toda vez que el porcentaje de descomposición es alta, no solo en la altura reducida, sino en las relaciones carbono-nitrógeno y presencia de elementos menores, lo que da cuenta de la alta biodegradabilidad, por lo que las convierte en una técnica idónea a ser implementada a escala real en los campus universitarios de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Si bien no todos los parámetros cumplen con la NTC 5167 de 2022 para que el material resultante puede catalogarse como abono orgánico, este podría ser usado en zonas verdes y jardines de la Sede, para el mejoramiento de las propiedades del suelo; además, las pacas biodigestoras, se constituyen en una alternativa para la gestión ambiental de los residuos generados en los campus universitarios.

5. Contribución de la Autoría

Primer autor: metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, escritura, borrador original. **Segundo autor:** investigación y análisis parcial de datos. **Tercer autor:** investigación y logística.

6. Agradecimientos

A la Unidad de Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín por el apoyo y logística para el montaje de la investigación, además de la gestión de recursos técnicos y económicos para los análisis de laboratorio.

Al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en la realización de ensayos fisicoquímicos del material resultante de las pacas biodigestoras.

7. Referencias

- Agreda, G., Deza, M., 2010. Factores que condicionan el proceso de compostaje. Powerpoint Present., nd 1–45.
- Ardila Delgado, J.L., Cano Córdoba, J., Silva Pérez, G., López Arango, Y., 2015. Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios. *producción + limpia* 10, 38–55.
- Bueno, P., Díaz, M., Cabrera, F., 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. *Compostaje* 1, 101–102.
- Carrasquilla, L.C.O., 2016. Pacas Biodigestoras: de los residuos al abono orgánico. *Revista Experimenta*.
- Carvajal Flórez, E., Abad Ramos, K., Galeano Morelo, M.J., Carvajal Moreno, C., Ogia Sofán, J.D., 2023. Informe de caracterización de residuos sólidos campus El Volador, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Carvajal-Flórez, E., Giraldo, L.F.M., 2020. Uso de residuos de café como biosorbente para la remoción de metales pesados en aguas residuales/Coffee Waste used as Biosorbent for Heavy Metals Removal in Wastewater. *Ingenierías USBmed* 11, 44–56.
- Correa, C.R.B., Díaz, J., Gil, C., Girón, K., León, M., Ortiz, O., Suarez, A., 2020. Dinámica de la descomposición de residuos orgánicos. *Suelos ecuatoriales* 50, 31–39.
- Coyago, E., Gonzales, K., Heredia, E., Sánchez, R.G., 2016. Recomendaciones para la caracterización y cuantificación de residuos sólidos universitarios. caso de estudio: Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, Quito. *La Granja* 23, 68–79.
- Dios Pérez, M., 2009. Estudio y desarrollo de técnicas respirométricas para el control de la estabilidad del compost. Universidad de Córdoba, Servicio de Publicaciones.
- Esfera Viva, 2017. Guillermo Silva: El mago del bosque urbano [WWW Document]. URL <https://esferaviva.com/guillermo-silva-el-mago-del-bosque-urbano/> (accessed 4.29.23).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2009. Guía para la descripción de suelos [WWW Document]. URL https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s00.htm (accessed 7.31.23).
- Gómez, G., 2010. Cultivo y beneficio del café. *Revista de Geografía Agrícola* 103–193.
- Hoyos, D., Alvis, N., Jabib, L., Garcés, M., Pérez, D., Mattar, S., 2008. Utilidad de los microorganismos eficaces (EM®) en una explotación avícola de Córdoba: parámetros productivos y control ambiental. *Rev MVZ Cordoba* 13, 1369–1379.
- ICONTEC, 2022. Norma Técnica Colombiana 5167. Productos para la Industria Agrícola, Productos Orgánicos usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas.
- Jaramillo Jaramillo, D.F., 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

- Márquez, P.B., Blanco, M.J.D., Capitán, F.C., 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje, in: Compostaje. Mundi-Prensa Libros, p. 93.
- Ossa Carrasquilla, L.C., 2016. Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia.
- 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.
- Ríos Escobar, J.H., 2016. Caracterización fisicoquímica de abonos orgánicos artesanales.
- ROA, G., Oliveros, C.E., Álvarez, J., Ramírez, C.A., Sanz, J.R., Dávila, M.T., Álvarez, J.R., Zambrano, D.A., Puerta, G.I., Rodríguez, N., 1999. Beneficio ecológico del café.
- Salazar Arce, T., 2016. Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos.
- Sanchez Gonzales, F., 2015. Evaluación de la producción de compost con microorganismos eficientes en el distrito de rupa rupa.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P., 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresour Technol* 78, 301–308.
- Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo SCCS, Morales, E.M., 2010. Ciencia del suelo: principios básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Suarez, J., 2012. Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio de café, en el municipio de Betania Antioquia: Usos y aplicaciones. Monografía de especialización. Corporación Universitaria la Sallista. 55.
- Tapia Mena, V. de las M., 2010. Estudio comparativo de la descomposición aerobia y anaerobia de la materia orgánica para el desarrollo de una metodología de elaboración de compost aplicable en pequeñas comunidades del área de influencia de ENAP SIPETROL.
- Tortosa, G., 2013. Caracterización agroquímica de un estiércol de oveja (o cabra). [WWW Document]. URL <http://www.compostandociencia.com/2013/03/caracterizacion-estiercol-oveja-y-cabra-html/> (accessed 7.31.23).