



Análisis de la influencia del tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de degradación biológica mediante pacas digestoras

Laura Juliana López Terreros

Trabajo final de práctica social para optar por el título de Ingeniería Ambiental

Asesor interno

Natalia Espinosa Aguirre, Ingeniera Ambiental

Asesor externo

Carlos Esteven Pulgarín Muñoz, Ph.D (c), MS.c, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín

2024

Cita	(López Terreros, 2024)
Referencia	López Terreros, L. J. (2024). <i>Análisis de la influencia del tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de degradación biológica mediante pacas digestoras</i> [Trabajo de grado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga.

Jefe departamento: Ana Lucía Pérez Patiño.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios por permitirme llegar a donde estoy, por darme la sabiduría para enfrentar cada reto del día a día y por colocar en mi camino personas tan increíbles y maravillosas que hacen más fácil el camino y más amena la vida.

Mi familia, quienes han sido mi principal apoyo, motor y felicidad quiero agradecerles por todo su amor y esfuerzo. Gracias a mi madre Maryluz Terreros y a mi padre Wilmar López por todas sus horas de trabajo para que a mí hermana y a mí no nos falte nada.

También, quiero agradecer a mi novio Cristian Ordoñez por su amor y apoyo incondicional, por estar conmigo en las situaciones adversas, por sus buenos consejos, por sus deliciosas comidas y por ser la persona más gentil y desinteresada que alguien podría tener en su vida.

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad de Antioquia por ser mi segundo hogar durante estos años de aprendizaje, por brindarme un espacio seguro en donde he podido crecer, conocerme y ser una mejor persona en lo académico, espiritual y deportivamente.

Agradezco a la Facultad de ingeniería por la formación profesional recibida, a sus docentes, por su dedicación y empeño, resaltando la labor del profesor Carlos Muñoz, la asesora Natalia Espinosa y la ingeniera Laura Linares, quienes con sus conocimientos han guiado el desarrollo de esta investigación.

A las empresas y entidades que han apoyado las investigaciones del Proyecto Giro Sostenible UdeA 2.0. Entre ellas, Corporación Académica Ambiental (Grupo de investigación Aliados con el Planeta), Centro de Extensión Académica de la Facultad de Ingeniería CESET, Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares GIEM, a la dirección de Bienestar Universitario, a la dirección de Regionalización y a la División de Infraestructura Física.

Contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2 Marco teórico	13
2.1 Tipos de residuos.....	13
2.2 Paca digestora.....	14
2.3 Parámetros fisicoquímicos	16
2.3.1 Temperatura	16
2.3.2 pH.....	17
2.3.3 Humedad.....	19
2.3.4 Altura de las pacas	19
2.3.5 Tamaño de partícula.....	19
2.4 Requisitos fisicoquímicos del abono.....	20
3 Metodología	22
3.1 Área de estudio.....	22
3.2 Diseño del experimento.....	22
3.2.1 Materiales e instrumentos	22
3.2.2 Replicas.....	23
3.2.3 Proporción de los materiales orgánicos	23
3.2.4 Ensamblaje.....	23
3.2.5 Construcción de las pacas	24

3.2.5.1 Caso 1: Triturado.....	24
3.2.5.2 Caso 2: Picado.....	25
3.2.5.3 Caso 3: Control.....	25
3.3 Muestreo o monitoreo	26
3.3.1 Técnicas	26
3.3.2 Mediciones.....	26
3.3.3 Desarme de las pacas	27
4 Resultados y análisis	28
4.1 Sustratos	28
4.2 Temperatura	30
4.3 pH.....	31
4.4 Humedad	33
4.5 Altura.....	35
4.6 Masa	36
4.7 Calidad del abono.....	39
5 Conclusiones	41
Referencias	43

Lista de tablas

Tabla 1 Peso específico, contenido en humedad, contenido de lignina y fracción biodegradable de los residuos de comida y de jardín	14
Tabla 2 Requisitos fisicoquímicos del abono orgánico.....	21
Tabla 3 Materiales e instrumentos.....	22
Tabla 4 Técnicas del experimento.....	26
Tabla 5 Caracterización de la muestra inicial	28
Tabla 6 Caracterización de la calidad del abono obtenido en pacas digestoras con residuos triturados, picados y control	40

Lista de figuras

Figura 1 Variación de la temperatura y el pH en diferentes etapas del compostaje	17
Figura 2 Rangos de temperatura y pH típicos observados en compostaje en hileras	18
Figura 3 Ensamblaje general de las pacas digestoras.....	24
Figura 4 Elaboración de pacas con residuos triturados	24
Figura 5 Elaboración de pacas con residuos picados	25
Figura 6 Elaboración de las pacas control.....	25
Figura 7 Toma de datos	27
Figura 8 Abono resultante	27
Figura 9 Temperatura promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control	31
Figura 10 pH promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control	33
Figura 11 Humedad promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control	34
Figura 12 Altura promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control.....	36
Figura 13 Pesos promedios iniciales, finales y de abono en porcentaje obtenidos de las pacas con residuos triturados, picados y control.....	37

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
C	Carbono
°C	Grado Celsius
C/N	Relación Carbono Nitrógeno
cm	Centímetro
GIEM	Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares
Kg	Kilogramo
m	Metro
m³	Metro cúbico
mm	Milímetro
msnm	Metros Sobre el Nivel del Mar
N	Nitrógeno
NTC	Norma Técnica Colombiana
P	Fósforo
RO	Residuos orgánicos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
T	Temperatura
Ton	Tonelada
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

En Colombia, en promedio, el 61% de los residuos generados son orgánicos, los cuales, debido a las actuales formas de gestión, contribuyen en la disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios, aumentan el riesgo de movimientos en masa, y liberan lixiviados. Para contrarrestar estas problemáticas, la Universidad de Antioquia ha venido investigando la biotecnología de pacas digestoras, ya que es un método limpio, sano, ecológico y económico para su tratamiento. De esta manera, el objetivo del presente trabajo fue analizar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de descomposición de la materia orgánica mediante el método de pacas digestoras. Para ello, se elaboraron tres casos de estudio, pacas con residuos triturados (1-5cm), picados (5-10 cm), y control (sin trituración). En cada caso de estudio se realizaron 2 pacas, para un total de 6, a las cuales se les midió pH, temperatura, humedad y altura durante tres meses. Luego de 87 días, se desarmaron las pacas, se tomaron los pesos finales y se evaluó la calidad del abono resultante. La mayoría de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del abono cumplieron con la Norma Técnica Colombiana 5167 del 2011. Además, se encontró que el tamaño de partícula de los residuos orgánicos no influyó en el tiempo de descomposición de la materia orgánica en pacas digestoras, pero si se obtuvieron importantes diferencias en cuanto al abono obtenido. Triturado produjo un 43% de abono; picado 33%; control 21%. Siendo triturado el método más eficiente.

Palabras clave: paca digestora, residuos orgánicos, materia orgánica, descomposición, tamaño de partícula.

Abstract

In Colombia, on average, 61% of the waste generated is organic, which, due to current management methods, contributes to the reduction of the useful life of sanitary landfills, increases the risk of mass movements, and releases leachates. To counteract these problems, the University of Antioquia has been investigating the biotechnology of digester bales, since it is a clean, healthy, ecological, and economical method for their treatment. Thus, the objective of this work was to analyze the influence that the particle size of organic waste has on the decomposition process of organic matter by means of the digester bale method. For this purpose, three case studies were elaborated, bales with shredded (1-5 cm), chopped (5-10 cm), and control (without shredding) waste. In each case study, 2 bales were made, for a total of 6, to which pH, temperature, humidity, and height were measured for three months. After 87 days, the bales were disassembled, the final weights were taken, and the quality of the resulting compost was evaluated. Most of the physicochemical and microbiological parameters of the compost complied with Colombian Technical Standard 5167 of 2011. In addition, it was found that the particle size of the organic residues did not influence the decomposition time of the organic matter in digester bales, but important differences were obtained in terms of the compost obtained. Shredded produced 43% compost; chopped 33%; control 21%. Shredded was the most efficient method.

Keywords: digester bale, organic waste, organic matter, decomposition, particle size.

Introducción

En Colombia aproximadamente el 61% de los residuos que se producen son orgánicos (Breukers & Puentes, 2021), los cuales terminan yendo a los rellenos sanitarios acortando su vida útil y causando problemas ambientales. De acuerdo con el último Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos emitido por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), la disposición final de residuos sólidos en el país fue de 11.983.709,70 toneladas al año (Superservicios, 2023), de las cuales se pudo haber aprovechado más del 50%.

En cuanto a la disposición final a nivel departamental, el departamento de Antioquia se encuentra como el segundo mayor generador de residuos sólidos en el país, con 4.194,92 Ton/Día (Superservicios, 2023). En consecuencia, los rellenos sanitarios de la región están llegando a su límite de carga. Por ejemplo, el cierre de operaciones del relleno sanitario La Pradera estaba previsto para septiembre del 2023. Pero, al no contar con un relleno sanitario de reemplazo, las autoridades ambientales han tenido que ampliar su tiempo de vida útil, aunque esto represente un potencial riesgo de movimientos en masa y liberación de lixiviados, lo que podría llegar a causar una contingencia ambiental y sanitaria (Zuleta Valencia, 2023). Por lo tanto, es necesario reducir la cantidad de residuos que llegan a los rellenos sanitarios, sea tratándolos desde los hogares, empresas, instituciones públicas o privadas como las universidades.

La Universidad de Antioquia (UdeA) produce grandes cantidades de residuos orgánicos y material aprovechable. Tan solo en el 2022 se produjeron más de 19,05 toneladas de compost y cerca de 67,36 toneladas de material reciclable (Universidad de Antioquia, 2023). Es por ello, que la Universidad de Antioquia ha venido trabajando en programas para la gestión integral de residuos sólidos, como es el proyecto Giro Sostenible UdeA. El cual, pretende aprovechar la mayor parte de los residuos orgánicos generados en la universidad empleando la tecnología de pacas digestoras o paca digestora Silva.

Las pacas digestoras son una biotecnología limpia, sana, ecológica y económica durante todo el proceso de descontaminación de los excedentes, que permite descomponer los residuos orgánicos y transformarlos en abono sin producir malos olores, plagas ni enfermedades (Silva Pérez, 2012). Sin embargo, al ser una tecnología reciente aún no se ha estudiado en detalle el proceso de degradación de la materia orgánica en pacas digestoras, por ejemplo, la influencia que pueda tener el tamaño de partícula de los residuos orgánicos en este proceso.

De esta manera, el objetivo de este trabajo es analizar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de descomposición de la materia orgánica mediante el método de pacas digestoras. Para ello, se elaboraron tres casos de estudio; el primero con residuos orgánicos triturados entre (1 a 5 cm) con trituradora, en el segundo se cortaron los residuos con tamaños entre (5 a 10 cm) y el tercer caso fue el control (sin trituración). En cada estudio se realizaron 2 pacas, para un total de 6, a cada una se les midió pH, temperatura, humedad, y disminución en la altura durante 3 meses. También, se tomó una muestra compuesta inicial de los sustratos y los pesos iniciales de cada paca. Luego de 87 días, se desarmaron las pacas, se tomaron los pesos finales de abono, se sacaron tres muestras compuestas de abono por tratamiento y se enviaron al laboratorio GIEM para conocer la calidad del abono resultante y saber si cumplen con la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 del 2011.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos en el proceso de degradación biológica mediante pacas digestoras.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos sobre la variación de los parámetros fisicoquímicos que intervienen en la degradación de la materia orgánica en pacas digestoras.
- Evaluar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos sobre la producción de abono usando el método de pacas digestoras.
- Evaluar la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos sobre la calidad del abono orgánico obtenido en pacas digestoras.

2 Marco teórico

2.1 Tipos de residuos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los desechos que se generan en las urbes y pueden ser orgánicos e inorgánicos, asimismo, presentan distintas características físicas, químicas y biológicas que intervienen en su tratamiento o transformación. Las principales características físicas son: el peso específico, el contenido de humedad, la capacidad de campo, la permeabilidad y la distribución y tamaño de partícula. Cabe mencionar, que la mayoría de los materiales que conforman los residuos sólidos son de forma irregular y esta irregularidad se puede reducir sustancialmente mediante la trituración. Entre las propiedades químicas de los RSU, podemos considerar su capacidad para ser usados como combustible o en el caso de los residuos orgánicos su aporte de nutrientes esenciales para la elaboración de abono. Entre las características biológicas, se tiene que la fracción orgánica de la mayoría de los RSU está compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina y ceniza (Tchobanoglous, 1994).

Con relación a los residuos orgánicos (RO), se pueden definir como aquellos residuos que se descomponen naturalmente en un tiempo relativamente corto, transformándose en otro tipo de materia orgánica (UNA Campus Sostenible, 2015). La materia orgánica de los RO está compuesta por azúcares complejos como la lignina, celulosa, hemicelulosa, almidón, (presentes en los residuos vegetales especialmente) y proteínas (presentes en los residuos animales especialmente), esta materia es atacada por microorganismos, quienes se encargan de su descomposición (Román et al., 2013). Algunos ejemplos de RO son los restos de comida, heces de animales o residuos de jardín.

En la gestión ambiental de los RO, se debe de tener en cuenta ciertas características físicas, químicas y biológicas que influyen en su tratamiento (ver **Tabla I**). En las físicas, está el peso específico que es la relación entre el peso de una sustancia y su volumen, el contenido de humedad que es la cantidad de agua que contiene el material y el tamaño de partícula que se explicará más adelante.

En las características químicas de los RO, se puede considerar el pH, el contenido de nutrientes y la relación C/N. El pH es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas, su escala de medición está en un rango de 0 a 14. Por ejemplo, en los suelos el pH usualmente fluctúa entre 4,0 a 8,0 y se considera que los suelos con $\text{pH} < 7$ son

ácidos y si el $\text{pH} > 7$ son alcalinos (Osorio, 2012). El contenido de nutrientes de los RO es clave cuando estos se van a utilizar para elaborar productos biológicos de conversión, como abono (Tchobanoglous, 1994). Entre los elementos del sustrato destacan: C, N, y P, macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Si los RO se van a compostar, también se debe tener en cuenta la relación C/N. Estos dos elementos deben encontrarse en la proporción adecuada para evitar que el proceso sea más lento en relaciones C/N altas, o para evitar la pérdida de nitrógeno en el caso de relaciones C/N bajas. La relación óptima de C/N en el compostaje es de 30 aunque según otros autores puede oscilar entre 26 y 35 (Delgado Rodríguez, 2012).

En las propiedades biológicas de los RO está el contenido de lignina y la fracción biodegradable (**Tabla 1**), estos dos últimos son importantes porque entre más alto sea el contenido de lignina menor será la biodegradabilidad (Tchobanoglous, 1994).

Tabla 1

Peso específico, contenido en humedad, contenido de lignina y fracción biodegradable de los residuos de comida y de jardín

Tipos de residuos	Peso específico, kg/m ³		Contenido en humedad, porcentaje		Contenido de lignina	Fracción biodegradable
	Rango	Típico	Rango	Típico		
	Residuos de comida	131-481	291	50-80		
Residuos de jardín	59-225	101	30-80	60	4,1	0,72

Nota. Adaptado de Tchobanoglous (1994).

Por todos los aspectos mencionados anteriormente, los RO pueden ser transformados por los microorganismos en abono o suelo bajo alguna técnica de transformación biológica, como el compostaje, vermicompost o las pacas digestoras.

2.2 Paca digestora

Las pacas digestoras son un método para el tratamiento biológico de la materia orgánica que permiten descomponer toda clase de excedentes biodegradables mediante la acción de microorganismos (Ossa Carrasquilla, 2016). Es una invención del tecnólogo ambiental Guillermo Silva Pérez, quien dice, que para construir una paca digestora Silva la capa externa debe estar

conformada por materia vegetal como hojarasca y poda, para que proteja a los residuos orgánicos del exterior y del oxígeno, evitando así su pudrición (Silva Pérez, 2012). En el interior, se colocan los residuos orgánicos a descomponer como restos de alimentos, frutas, verduras, borra de café, entre otros. Luego, se cubre nuevamente con una capa de hojarasca, se compacta, y se repite el proceso hasta llenar el molde de la paca u obtener la altura deseada. Cabe mencionar que una paca de un metro cuadrado puede digerir entre 500 a 600 kg de residuos orgánicos (Ossa Carrasquilla, 2016), siendo un método práctico que permite aprovechar grandes cantidades de residuos orgánicos en poco espacio.

Los residuos orgánicos dentro de las pacas pueden ser degradados por distintos organismos y procesos. Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos (Tchobanoglous, 1994). Estas transformaciones pueden ser aerobias (presencia de oxígeno), anaerobias (ausencia de oxígeno) o en el caso de las pacas digestoras anaerobias facultativas. Según Decheco (2011) la digestión de la materia orgánica mediante el método de paca biodigestora se efectúa bajo condiciones anaerobias no estrictas, donde los niveles de oxígeno son tan bajos que no favorece el desarrollo de microorganismos aerobios, sino de microorganismos anaerobios facultativos, los cuales son capaces de vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno molecular y aunque no lo usan para su crecimiento ni obtención de energía, éste no les es tóxico.

En el interior de las pacas digestoras se pueden encontrar diversas comunidades de macroinvertebrados desempeñando múltiples roles, en donde se destacan los filos: Arthropoda y Annelida. En el estudio llevado a cabo por Quiceno (2021), se encontró que los principales macroinvertebrados presentes en la transformación de la materia orgánica en las pacas digestoras son los artrópodos, estando presentes las clases *Hexapoda* y *Arachnida*. En los hexápodos, se identificaron dos subclases, *Entognatha* e *Insecta*, siendo esta última la que contiene mayor cantidad de morfotipos presentes. En cuanto al Filo Annelida, está la clase *Clitellata*, donde se encuentran las lombrices de tierra, quienes juegan un rol importante en la transformación de la materia orgánica en suelo (Quiceno, 2021). En resumen, los principales macroinvertebrados que participan en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos dentro de las pacas digestoras pertenecen a los filos Arthropoda y Annelida, a la vez, dentro de estos están los siguientes órdenes; *Collembola*, *Coleoptera*, *Diptera*, *Hemiptera*, *Psocoptera*, *Hymenoptera*, *Dermaptera*, *Acari*, *Aranea*, *Isopoda* y *Crassiclitellata* respectivamente.

2.3 Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos más importantes que intervienen en el proceso de degradación de la materia orgánica son: temperatura, pH, humedad, altura de las pacas y tamaño de partícula.

2.3.1 Temperatura

La temperatura permite analizar la eficiencia y el grado de estabilización al que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica. El incremento de la temperatura de la masa que se está degradando se asocia con una mayor actividad microbiana, así mismo, cada microorganismo tiene un intervalo de temperatura óptima para que su actividad sea mayor y más efectiva, para los microorganismos mesófilos es de 15-40°C y para los termófilos es de 40-70 °C (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

En el proceso de descomposición de la materia orgánica mediante el método del compostaje se pueden identificar tres fases principales: la primera es la fase mesófila inicial con $T < 45^{\circ}\text{C}$; la segunda es la fase termófila con $T > 45^{\circ}\text{C}$; y la tercera es la fase mesófila final o enfriamiento que es cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial (Bueno Márquez et al., 2008).

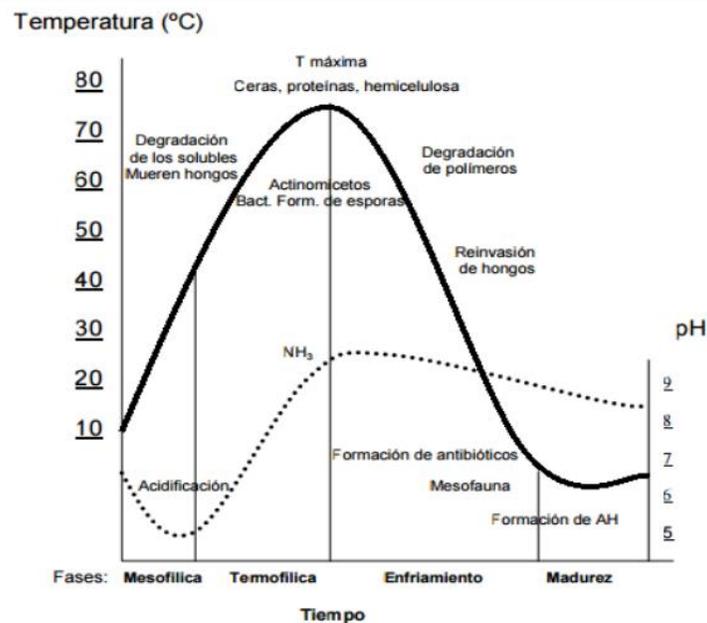
- **Fase mesófila inicial:** En esta fase el material de partida comienza el proceso a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso horas), la temperatura aumenta hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor (Román et al., 2013).
- **Fase termófila:** Es cuando el material alcanza temperaturas mayores a los 45°C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias termófilas, que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. Esta fase también recibe el nombre de fase de higienización ya que el

calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp* (Román et al., 2013).

- **Enfriamiento:** La tasa de descomposición y la temperatura disminuye a valores cercanos al ambiente. Posteriormente, se produce una colonización por microorganismos mesófilos (Bohórquez Santana, 2019).

Figura 1

Variación de la temperatura y el pH en diferentes etapas del compostaje



Nota. La línea negra sólida representa la variación de la temperatura y la línea punteada muestra la variación del pH durante las cuatro fases del compostaje (fase mesofílica, termofílica, enfriamiento y madurez). Tomado de Costa et al. (1991).

2.3.2 pH

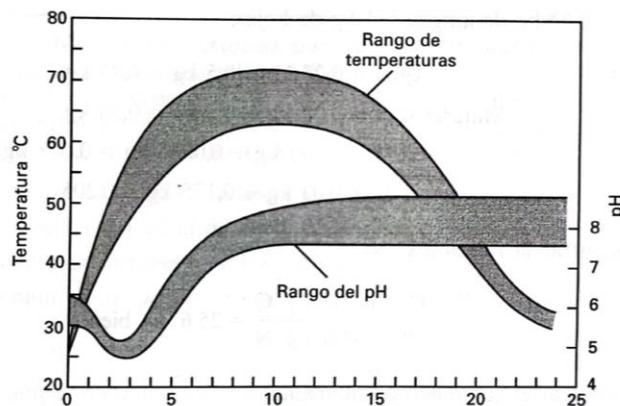
El pH es otro parámetro importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de residuos. La actividad metabólica de los microorganismos presentes en una pila de compostaje condiciona variaciones en los valores de pH, que a su vez dependen en gran medida del valor de pH de las materias primas. Por un lado, las bacterias prefieren valores de pH comprendidos entre 6 y 7,5, mientras que los hongos toleran un rango más amplio que puede oscilar entre 5,5 y 8. Si el pH desciende por debajo de 6, los procesos de descomposición microbianos, especialmente por

parte de las bacterias, se detiene. Y si el pH es mayor a 9, se favorece la conversión de nitrógeno en amonio, afectando negativamente el crecimiento y actividad de los microorganismos (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). Por lo tanto, para lograr una descomposición aerobia óptima en el compostaje el pH debe permanecer en un rango de 7 a 7,5 (Tchobanoglous, 1994).

El control del pH en las tres fases del compostaje (mesófila, termófila, enfriamiento), también varía de forma particular, siguiendo el comportamiento de la **Figura 2**.

Figura 2

Rangos de temperatura y pH típicos observados en compostaje en hileras



Nota. La gráfica muestra los rangos de temperatura y pH que se pueden tener en el compostaje en hileras durante 25 días. Tomado de Tchobanoglous (1994).

- **Fase mesófila inicial:** En la primera fase el pH disminuye a causa de los ácidos orgánicos que se producen en la descomposición de compuestos solubles como los azúcares, el pH puede bajar hasta cerca de 4,0 o 4,5 y esta fase dura entre dos a ocho días (Román et al., 2013).
- **Fase termófila:** En la segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero et al., 2001).
- **Enfriamiento:** En la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón (Bueno Márquez et al., 2008).

2.3.3 Humedad

La humedad es un parámetro muy importante en el proceso de degradación biológica de residuos orgánicos. Los microorganismos presentes, como todos los seres vivos, necesitan el agua para transportar y disolver los nutrientes. La presencia de agua dentro de la pila es imprescindible para sus necesidades fisiológicas, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso (Bueno Márquez et al., 2008).

Si la humedad baja por debajo del 45% se puede detener el proceso de degradación por falta de agua para los microorganismos. Humedades por debajo del 20% inhiben casi totalmente la actividad microbiana, especialmente la bacteriana. Por otro lado, un exceso de agua (>65%) podría generar un lavado de nutrientes por lixiviación (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008; Román et al., 2013)).

2.3.4 Altura de las pacas

La relación inversa entre la altura de la paca y el tiempo de descomposición permiten saber el estado de evolución del proceso, se estima que el tiempo mínimo para obtener un abono orgánico maduro es de alrededor seis meses cuando una paca de un metro cubico ha alcanzado una altura de 50 cm, pero estos valores son aproximados (Ossa Carrasquilla et al., 2020).

En el caso del compostaje, la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y pérdida de carbono en forma de CO_2 . También, influye la naturaleza física y químicas de los materiales de partida, los microorganismos presentes y los parámetros operacionales del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH) (Delgado Rodríguez, 2012).

2.3.5 Tamaño de partícula

El tamaño de las partículas de los residuos orgánicos es otro factor importante en el proceso de degradación de la materia orgánica. Aunque, cabe aclarar que en las pacas digestoras aún no se ha estudiado la influencia que tiene el tamaño de partícula de los residuos orgánicos en su

descomposición, por lo que se tuvo en cuenta bibliografía sobre compostaje al ser técnicas similares.

El tamaño inicial de las partículas que componen los residuos a compostar son un parámetro importante para la optimización del proceso. Un tamaño de partícula reducido incrementa la velocidad de las reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje aerobio (Tchobanoglous, 1994). Esto es debido a que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción (Bueno Márquez et al., 2008). Por lo tanto, el desmenuzamiento del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

El tamaño de partícula más deseable para el compostaje es menor a 5 cm, pero se pueden fermentar partículas más grandes (Tchobanoglous, 1994). Otros autores, sugieren que el tamaño de partícula adecuado para descomponer los residuos orgánicos debe de estar entre 1 y 5 cm (Haug, 1993), entre 2 y 5 cm (Kiehl, 1985), o entre 2,5 y 2,7 cm (Tchobanoglous, 1994).

Por otra parte, un tamaño de partícula muy fino tampoco es aconsejable por riesgos de compactación. Si bien un tamaño pequeño de partícula provoca una gran superficie para el ataque microbiano, también se reduce el espacio entre partículas y aumenta las fuerzas de fricción (Haug, 1993). Esto limita la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior, lo que restringe la proliferación microbiana y puede dar lugar a un colapso microbiano (Delgado Rodríguez, 2012). En conclusión, un tamaño pequeño de partícula acelera el compostaje al ser susceptible al ataque microbiano, pero si es demasiado pequeño, puede provocar la compactación del material y generar condiciones de anoxia (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

2.4 Requisitos fisicoquímicos del abono

Para conocer la calidad del abono resultante de las pacas digestoras se debe tener en cuenta la normativa vigente, en Colombia es la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 del 2011. Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo en Colombia (ver **Tabla 2**).

Tabla 2*Requisitos fisicoquímicos del abono orgánico*

Parámetro	Unidad	Parámetro por garantizar
Humedad	%	Máximo 20 (origen animal) Máximo 30 (origen vegetal)
Cenizas	%	Máximo 60
Carbono orgánico oxidable	%	Mínimo 15
pH	pH	4 a 9
Densidad real (en base seca)	g/cm ³	Máximo 0,6
Retención de humedad	%	Mínimo 100
Capacidad de intercambio catiónico	(meq/100g)	Mínimo 30
Nitrógeno total	%	Reportar si es >1
Fósforo total	%	Reportar si es >1
Potasio total	%	Reportar si es >1
Silicio total	%	Máximo 50 de cenizas
Metales pesados (máximo)	mg/kg	Arsénico (As) 41
		Cadmio (Cd) 39
		Cromo (Cr) 1200
		Mercurio (Hg) 17
		Níquel (Ni) 420
		Plomo (Pb) 300

Nota. La bacteria *Salmonella spp* debe estar ausente en 25 g, los coliformes totales deben ser menor a 1000 NMP y los fitopatógenos deben estar ausentes en la muestra (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5167, 2011).

Por otro lado, la calidad del abono está influenciada por el material de partida, por el desarrollo del proceso de compostaje, por la procedencia del material, por el tipo de recogida, y por el tratamiento del residuo (tipo de tecnología, equipamiento, funcionamiento, organización y seguridad en el trabajo). Los diferentes materiales que se pueden compostar determinan los tipos de compost que pueden obtenerse (Delgado Rodríguez, 2012).

3 Metodología

3.1 Área de estudio

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el Campus principal de la Universidad de Antioquia (Medellín), allí, se recolectaron los residuos, se construyeron las pacas y se hizo el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos de interés.

La ciudad de Medellín está a 1.495 msnm y presenta las siguientes características climatológicas: El clima es templado-seco. La temperatura promedio es de 21,5 °C. Al medio día, la temperatura máxima media oscila entre 26 y 28°C y en la madrugada la temperatura mínima está entre 17 y 18°C. La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 63 y 73 %, siendo mayor en la época lluviosa del segundo semestre (IDEAM, 2018).

El promedio de lluvia total anual es de 1.685 mm. Durante el año las lluvias se distribuyen en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas. Los meses de enero y febrero son los más secos del año. Las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre (IDEAM, 2018).

3.2 Diseño del experimento

3.2.1 Materiales e instrumentos

Los materiales que se emplearon en la elaboración de las pacas, y los instrumentos con los que se midieron los parámetros fisicoquímicos se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Materiales e instrumentos

Materiales	Instrumentos
Molde de madera 0,125 m ³	Balanza
Residuos orgánicos	Termómetro de suelo de compost
Trituradora	Medidor de pH del suelo
Tamiz para abono	Medidor con sensor de humedad
Pala	Flexómetro

En cuanto a los residuos orgánicos, los residuos de frutas y verduras se tomaron de la “cafetería juguitos de la UdeA” ya que en este local hay una buena separación de la fuente, la borra de café se recolectó de los “Domos Café” y los residuos de jardín como chamizos y hojarasca se recogieron de las zonas verdes.

3.2.2 Replicas

El experimento se realizó por duplicado para tres casos de estudio (6 pacas en total), con el fin de garantizar la validez de los datos. Las pacas del primer caso de estudio se hicieron con residuos orgánicos triturados entre (1 a 5 cm) con trituradora, en el segundo caso de estudio se picaron los residuos orgánicos con tamaños entre (5 a 10 cm) y el tercer caso son las pacas control (sin trituración).

3.2.3 Proporción de los materiales orgánicos

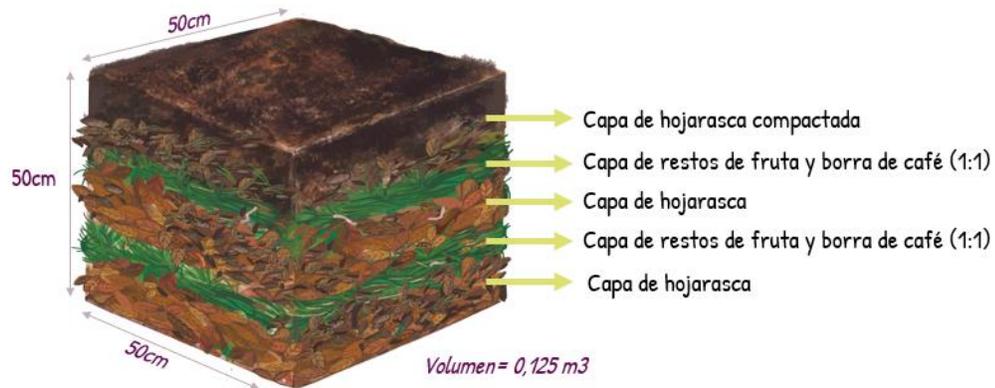
Las pacas se conformaron con restos de frutas, borra de café y residuos de jardín en una proporción (8kg: 8kg: 30kg) respectivamente. Los restos de frutas y borra de café deben de mantener una relación (1:1). La cantidad de residuos de jardín en una paca puede ser diferente a 30 kg, ya que dependerá de si estos están triturados, de la humedad que contengan, o del del tipo de residuo (hojarasca seca, húmeda, chamizos o poda), lo importante es que la hojarasca sea suficiente para cubrir los residuos.

3.2.4 Ensamblaje

Para armar las 6 pacas del experimento, se utilizó un molde de madera desarmable de 0,125 m³ (50 cm alto x 50 cm largo x 50 cm ancho). Las pacas se construyeron al aire libre sobre el suelo para que se dé el proceso de descomposición. Los residuos orgánicos se pesaron hasta obtener las cantidades descritas en el numeral 3.2.3, además, se realizó un pretratamiento que dependió del caso de estudio, y los residuos de frutas y la borra de café se fueron depositando en el centro de la paca de tal forma que quedarán protegidos con hojarasca del exterior. El ensamblaje general para construir las pacas se presenta en la **Figura 3**.

Figura 3

Ensamblaje general de las pacas digestoras



Nota. Los residuos orgánicos tienen un pretratamiento dependiendo del caso de estudio. **caso 1: Triturado;** residuos con tamaños entre 1-5cm. **caso 2: Picado;** tamaño de partícula de 5-10 cm. **caso 3: Control;** sin tratamiento.

3.2.5 Construcción de las pacas

Inicialmente se sacó una muestra compuesta inicial de los residuos orgánicos empleados para realizar una caracterización inicial. Esta muestra fue de 2 kilogramos y se envió al laboratorio GIEM para realizar un análisis fisicoquímico.

3.2.5.1 Caso 1: Triturado. Para armar las pacas del primer caso de estudio, se trituraron los restos de frutas y la hojarasca con una trituradora para garantizar que los residuos quedaran con un tamaño de partícula de 1 a 5 cm. Luego, se pesaron los residuos orgánicos a emplear sacando las cantidades necesarias (8kg Frutas: 8kg borra café: 30kg hojarasca). Posteriormente se siguió el ensamblaje de la **Figura 3**, obteniéndose las pacas “triturado 1” y “triturado 2” (ver **Figura 4**).

Figura 4

Elaboración de pacas con residuos triturados



3.2.5.2 Caso 2: Picado. Para el segundo caso de estudio, se cortaron los residuos de comida y de jardín de tal forma que quedarán con tamaños entre 5 a 10 cm. Luego, en una báscula se pesaron los residuos orgánicos sacando las proporciones descritas en el numeral 3.2.3. Después, se procedió a armar sus dos respectivas pacas siguiendo el ensamblaje general de la **Figura 3**.

Figura 5

Elaboración de pacas con residuos picados



Nota. La paca “picado 1” se elaboró con hojarasca seca mientras que la paca “picado 2” se utilizó residuos de poda.

3.2.5.3 Caso 3: Control. Para el tercer caso de estudio, que es blanco o control no se realizó ningún pretratamiento a los residuos orgánicos. Se tomaron los pesos iniciales de los residuos; 8kg fruta, 8kg borra de café, y 30 kg hojarasca seca. Se procedió a construir las pacas “control 1” y “control 2” siguiendo el ensamblaje de la **Figura 3**.

Figura 6

Elaboración de las pacas control



3.3 Muestreo o monitoreo

3.3.1 Técnicas

Los parámetros fisicoquímicos que se midieron en cada una de las 6 pacas son la temperatura, pH, humedad y disminución de la altura. Para ello, se emplearon las técnicas descritas en la **Tabla 4**. También se evaluó la calidad del abono obtenido en los tres tratamientos (triturado, picado, control).

Tabla 4

Técnicas del experimento

PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA
Temperatura	°C	Termometría de contacto
pH	pH	Potenciométrico
Humedad	%	Sensores de humedad
Altura de la paca	cm	Medición lineal
Calidad del abono	Informe completo de acuerdo con la NTC 5167 del 2011	Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 del 2011

3.3.2 Mediciones

Las mediciones se realizaron aproximadamente por 3 meses, desde noviembre de 2023 hasta febrero de 2024. Durante todo el experimento (87 días) los datos se tomaron entre las 9am y 12 de la mañana. En la primera semana, los parámetros fisicoquímicos se midieron diariamente por 8 días. En la segunda semana, se hicieron tres mediciones. De ahí en adelante, como los datos ya presentaban cierta repetitividad se midió solo dos veces por semana, los martes y viernes.

Para tomar los datos, los instrumentos se colocaron en el centro de la paca, de tal forma que las sondas quedaran completamente en el interior. En cuanto a la altura, se usó un flexómetro y se midió la distancia entre la parte superior e inferior de la paca, se sacó una altura promedio entre la altura de la cara frontal y trasera (ver **Figura 7**).

Figura 7*Toma de datos*

Nota. En la **figura a** se está midiendo la humedad con el sensor de humedad del suelo. En la **figura b** está el multiparamétrico con el que se midió el pH y la temperatura. La **figura c** muestra la técnica con la se midió la altura.

3.3.3 Desarme de las pacas

Luego de 3 meses, se desarmaron las pacas, se tamizó el abono y se tomaron los pesos finales (ver **Figura 8**). El peso final de cada paca estaba compuesto por un peso en abono y otro en material grueso sin degradar, como piedras, ramas y hojarasca. También, se sacaron 3 muestras compuestas de abono por tratamiento (triturado, picado, control), estas muestras se llevaron al laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares- GIEM para evaluar la calidad del abono obtenido y saber si cumple con la Norma Técnica Colombiana 5167 del 2011.

Figura 8*Abono resultante*

Nota. La **figura a** es abono compactado de la paca "triturado 2". En la **figura b** se tiene abono de la paca "triturado 1". La **figura c** muestra el proceso de tamizaje.

4 Resultados y análisis

4.1 Sustratos

Inicialmente se sacó una muestra de 2 kg compuesta por todos los sustratos o residuos de las pacas. Esta muestra se envió al laboratorio GIEM, y en la **Tabla 5** se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5

Caracterización de la muestra inicial

RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS		
Parámetro	Resultado (base seca)	Unidad
Humedad	64,1	%
Cenizas	24,2	%
Pérdida por volatilización	75,8	%
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	49,5	meq/100g
Carbono orgánico oxidable total (CO)	34,1	%
CIC/CO	145,3	meq/100g CO
Capacidad de Retención de Humedad (CRA)	147,2	%
Densidad real	0,5	g/cm ³
pH	5,17	pH
Conductividad eléctrica	0,16	dS/m
N-Org. total	1,76	%
C/N	19,4	-
Fósforo total (P ₂ O ₅)	0,102	%
Potasio total (K ₂ O)	1,075	%
Calcio total (CaO)	1,262	%
Magnesio total (MgO)	0,615	%
Zinc total (Zn)	0,00499	%
Sodio total (Na)	0,0521	%
RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS		
Parámetro	Resultado	Requisito
<i>Salmonella</i> spp	Ausente	Ausente en 25 g
<i>Coliformes</i> totales	> 2400	<1000 NMP o UFC/g
Huevos de helminto viables	0	<1 en 4g de muestra (base seca)
Fitopatógenos	Ausente	Ausente

La muestra compuesta inicial estaba conformada por residuos de frutas y verduras como cascara de naranja, sandía, banano, piña, papa, plátano, pulpas y semillas de frutas, también por borra y filtros de café, como residuos de jardín. La humedad de esta muestra fue de 64,1 %, lo cual coincide con los valores presentados en la **Tabla 1**, en donde el valor típico de humedad para los residuos de comida es de 70% y de jardín 60%. El pH de los sustratos fue ligeramente ácido (5,17), esto es debido al pH ácido que presenta el café y a la acidez de las frutas cítricas, como las naranjas y el limón. Aun así, se encuentra dentro del rango de la norma (4 a 9).

Entre los elementos que componen un sustrato destacan el C, N, y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. El carbono, es necesario en la síntesis celular para la formación del protoplasma, así como la de los lípidos, grasas y carbohidratos; durante el metabolismo se oxida para producir energía y anhídrido carbónico; es el elemento que debe estar en mayor cantidad ya que constituye el 50% de las células de los microorganismos y el 25% del anhídrido carbónico que se desprende en la respiración. El nitrógeno, es un elemento esencial para la reproducción celular debido a la naturaleza proteica del protoplasma; y se ha demostrado que la calidad de un abono como fertilizante está directamente relacionada con su contenido de N. El fósforo, desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). Los resultados obtenidos en la muestra de C, N y P son: 34,1%, 1,76%, y 0,102%.

La relación C/N del material de partida es un parámetro importante para que se aproveche y se retenga la mayor parte del C y del N. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35 (Jhorar et al., 1991).

La muestra inicial obtuvo una relación C/N de 19,4, un valor que está por debajo del recomendado (30). Si los sustratos poseen una relación C/N baja (inferior a 18-19), el proceso se llevará a cabo con mayor rapidez (Golueke & Diaz, 1987; Zhu, 2006), pero el exceso de nitrógeno se desprenderá en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N (Jhorar et al., 1991).

Por otra parte, el fósforo es el nutriente más importante, tras el carbono y el nitrógeno, por lo que también debe estar presente en unas cantidades mínimas para que el proceso se lleve a cabo

correctamente. La relación N/P debe estar entre 5 y 20 (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008). La relación que se obtuvo en la muestra de N/P fue de 17,25, lo cual cumple con lo recomendado.

En cuanto a los parámetros microbiológicos, se puede ver en la **Tabla 5** que los resultados de *Salmonella* spp, huevos de helminto y fitopatógenos cumplen con la Norma Técnica Colombiana 5167 de 2011. El único parámetro que no cumple con la norma son los Coliformes totales, ya que la muestra contenía más de 2400 NMP coliformes totales en 100 gramos, pero se espera que este valor disminuya en la fase de higienización en pacas y obtener un abono libre de coliformes.

4.2 Temperatura

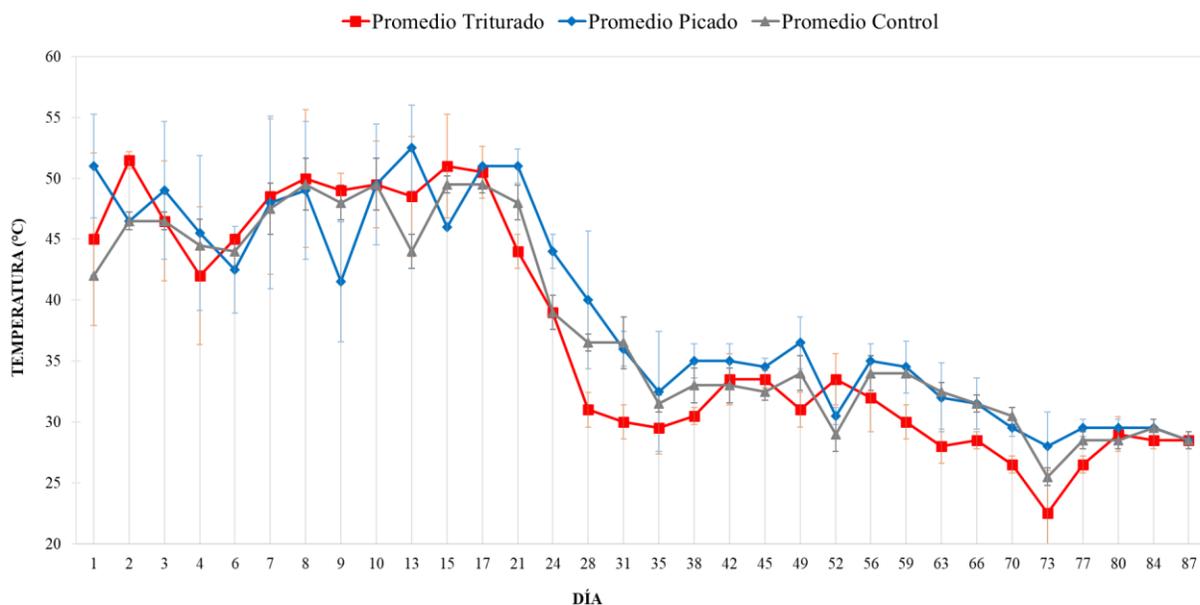
El comportamiento de la temperatura en los primeros 6 días corresponden a la fase mesófila inicial ($T < 45^{\circ}\text{C}$), ya que se tienen temperaturas promedio que predominan entre los 42 y 45 °C, aunque también se registraron valores entre los 45 y 51 °C, especialmente en las pacas con residuos triturados y picados. Esto posiblemente se debe que al ser menor el tamaño de partícula de los residuos es mayor el área superficial para el ataque microbiano, lo que facilita la degradación y el crecimiento de microorganismos que generan calor, aumentando la temperatura del material. También, porque inicialmente hay una gran cantidad de sustratos disponibles que favorecen el crecimiento y desarrollo microbiano. El síntoma más claro de la actividad microbiana es el incremento de la temperatura de la masa que se está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang et al., 2003; Miyatake & Iwabuchi, 2006).

La fase termófila, que es la fase en la que se alcanzan las temperaturas más altas en el proceso de degradación ($T > 45^{\circ}\text{C}$), se puede considerar entre el día 7 al 21. En este intervalo de tiempo se tienen temperaturas promedio que van desde los 45 °C hasta los 52,5 °C; obteniéndose una temperatura máxima Promedio Triturado de 51 °C; Picado de 52,5 °C; y Control de 49,5 °C. En esta fase se registran las temperaturas más altas del proceso de transformación de la materia orgánica, proliferan exclusivamente microorganismos termo tolerantes y termófilos como actinomicetos (*Thermoactinomyces* sp.), diversos *Bacillus* spp. Termófilos y bacterias gram negativas, y los microorganismos no termo tolerantes como patógenos y parásitos se inhiben en esta fase (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

La fase mesófila final o enfriamiento, que es cuando la temperatura disminuye hasta llegar a la temperatura ambiente, se identifica desde el día 24 hasta el día 70. En la **Figura 9** se puede apreciar como en el día 24 la temperatura empieza a descender por debajo de los 44 °C hasta llegar a temperaturas cercanas a los 30°C, asemejándose cada vez más a la temperatura ambiente de Medellín. Finalmente, está la fase de madurez que va desde el día 73 al 87, en donde la temperatura de las pacas se estabiliza y son iguales o cercanas al ambiente, oscilando entre los 22,5 y 29,5 °C. En esta última fase, la producción de calor decrece debido al agotamiento de compuestos fácilmente biodegradables y, como consecuencia de la reducción de la actividad microbiana. Una vez finalizado el proceso se obtiene un producto humificado estable o maduro en el que los mecanismos de descomposición microbiana no ocurren o lo hacen de forma muy lenta (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

Figura 9

Temperatura promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control



4.3 pH

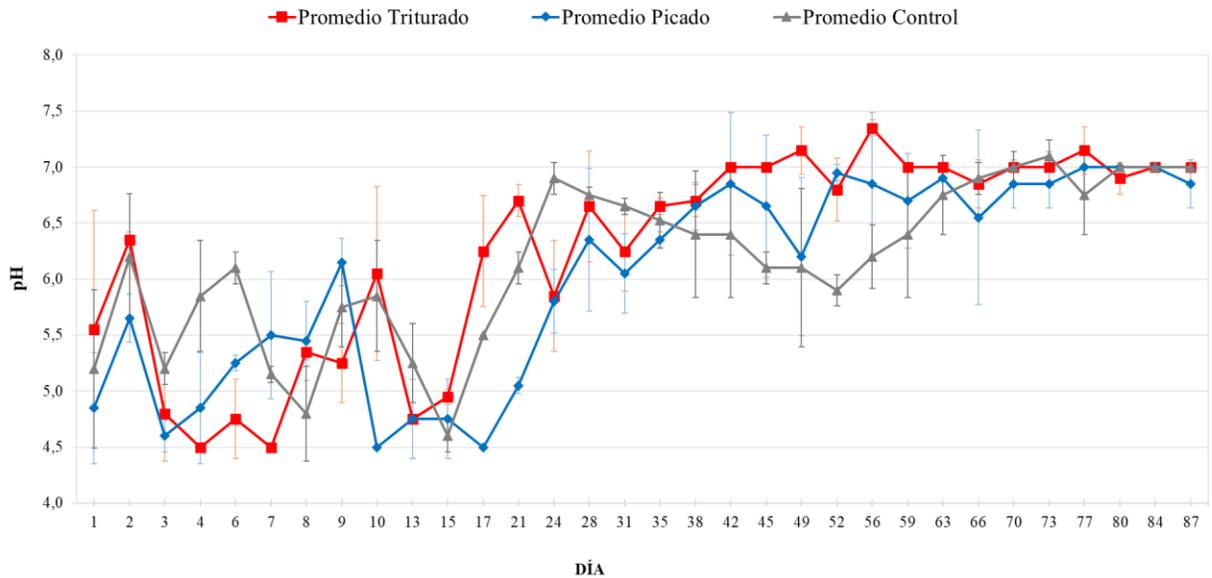
En los tres casos de estudio, los valores de pH oscilaron entre 4,5 y 7. Las pacas con residuos triturados registraron un pH máximo promedio de 7,35, pH mínimo promedio de 4,5 y promedio

de 6,25. Las pacas con residuos picados registraron un pH máximo promedio 7,0, pH mínimo promedio 4,5 y promedio 6,01. Las pacas control tuvieron un pH máximo promedio 7,10, pH mínimo promedio 4,6 y promedio 6,17.

El comportamiento del pH durante el experimento se puede dividir en dos etapas principales. La primera etapa va desde el día 1 al 17; comprende la fase mesófila inicial y termófila; es donde se registran los valores más bajos de pH (<7). La segunda etapa va desde el día 21 al 87; es la fase mesófila final o enfriamiento; se tienen valores de pH cada vez más cercanos a 7 hasta terminar en dicho valor, como se muestra en la **Figura 10**.

En los primeros días del experimento (día 1-17), se registran los valores más bajos de pH, valores que predominan en el rango de 4,5 a 5,5. Durante esta fase inicial se observa una disminución del PH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Si las bajadas de pH son muy pronunciadas, es porque existen condiciones anaeróbicas, y por lo tanto se formarán más ácidos orgánicos (Sánchez-Monedero et al., 2001). En resumen, en esta etapa los microorganismos están descomponiendo los residuos orgánicos y se están produciendo ácidos orgánicos, los cuales provocan un descenso en el pH.

En la fase de enfriamiento (día 21-87), se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero et al., 2001). En esta etapa el pH comienza a subir y a presentar una tendencia a estabilizarse en 7. En el día 73 al 87 ya se ha estabilizado en dicho valor, llegando a la neutralidad. Cuando esta estabilización no se alcanza se considera un parámetro indicativo de falta de madurez del producto (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

Figura 10*pH promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control*

4.4 Humedad

Las pacas con residuos triturados presentaron una humedad máxima promedio de 100%, mínima de 1,5%, promedio de 53,88%. Las pacas con residuos picados tuvieron una humedad máxima promedio de 100%, mínima de 15,5%, promedio de 63,82%. Las pacas control presentaron una humedad máxima promedio de 100%, mínima de 15%, promedio de 62,61%.

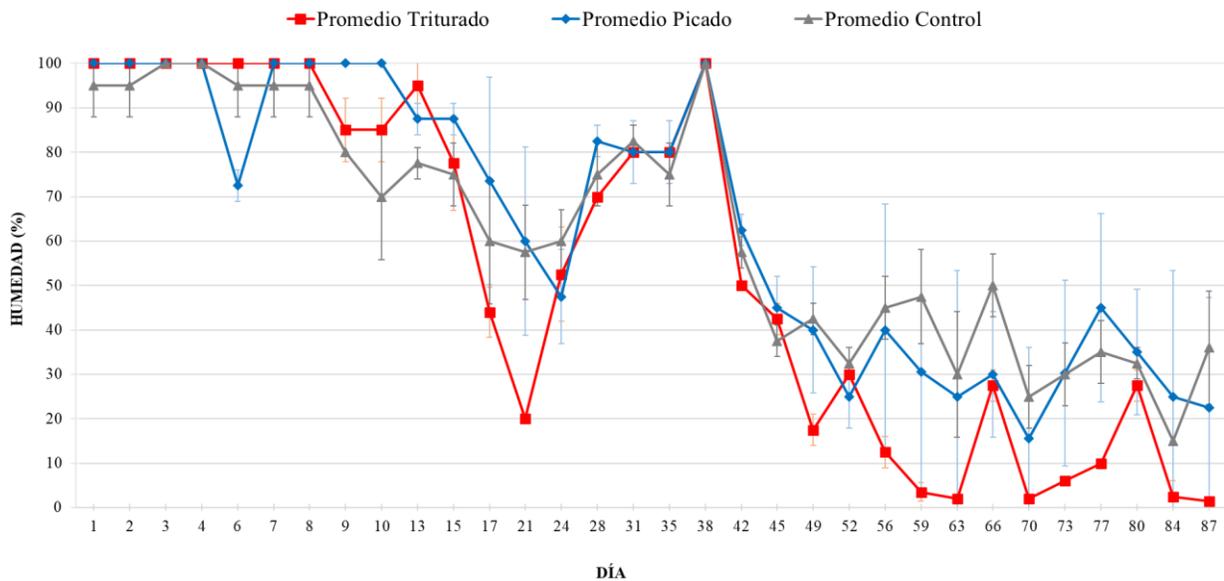
Todas las pacas del experimento se construyeron al aire libre, estando expuestas a las condiciones climáticas de Medellín, lo que influyó en el comportamiento de la humedad. En la **Figura 11**, se ve desde el día 1 (22/11/2023) hasta el 15 (6/12/2023) valores de humedad superiores al 70%, y no es de extrañar, ya que en estos días llovió con frecuencia, coincidiendo con la segunda época de lluvias de Medellín que va de finales de septiembre a principios de diciembre (IDEAM, 2018). Desde el día 45 (5/01/2024) la humedad en los tres tratamientos comienza a descender del 50%, obteniéndose en el día 87 (16/02/2024) humedades promedio finales de; 1,50% Triturados; 22,5% Picados; 36% Control. Comportamiento que coincide con la primera temporada seca de Medellín, correspondiente a los meses de enero y febrero. Además, durante el desarrollo del experimento el Índice Oceánico de El Niño del trimestre (diciembre/23-febrero/24) fue +1,8°C;

este valor junto con el de los dos trimestres anteriores (octubre-diciembre/23 +1.9°C noviembre/23-enero/24 +2.0°C) pone en manifiesto que las condiciones climáticas estuvieron bajo la influencia de un Fenómeno El Niño de intensidad fuerte (Melo & Ruiz, 2024), el cual se caracteriza por presentar altas temperaturas y bajas precipitaciones.

La humedad también juega un rol importante en el proceso de degradación de la materia orgánica. La presencia de agua es imprescindible para satisfacer las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que el agua es el medio de transporte tanto de las sustancias que sirven de alimento a las células, como de los productos de desecho de la reacción (Tseng et al., 1995). Es por esto, que en los primeros 13 días se tiene una mayor actividad microbiana (las temperaturas son más altas), los sustratos y las pacas contienen valores de humedad de más del 60%, lo que facilita el transporte de nutrientes, además, hay una gran disponibilidad de alimento para el crecimiento de los microorganismos. De la misma forma, desde el día 45 al 87 la actividad microbiana ha disminuido (las temperaturas son más bajas), los microorganismos ya han transformado gran parte de la materia orgánica, por lo que es menor la cantidad de sustratos y de humedad que hay en el medio.

Figura 11

Humedad promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control



4.5 Altura

La altura inicial promedio de las pacas triturado fue de 43 cm; las pacas picado 45 cm; y las pacas control 44,5 cm. La altura final promedio en las pacas triturado fue de 25,5 cm; picado 24,5 cm; control 23cm.

La disminución en la altura de las pacas se dio paulatinamente en el tiempo, y el comportamiento fue similar para los tres casos de estudio (Triturado, Picado, Control), como se puede ver en la **Figura 12**. La altura promedio de las pacas triturados se redujo en un 40,70%; picado en un 45,56%; y control en un 48,31%. El tratamiento que presentó una mayor reducción en su altura fue el control, seguido de picado, y último triturado. La pérdida de altura y peso en las pacas se debe a múltiples factores como: la mineralización de la materia orgánica, la biodegradabilidad de los sustratos iniciales, la pérdida de agua de los sustratos, la disminución de humedad en forma de evapotranspiración, filtración y lixiviados, y la liberación de gases a la atmósfera.

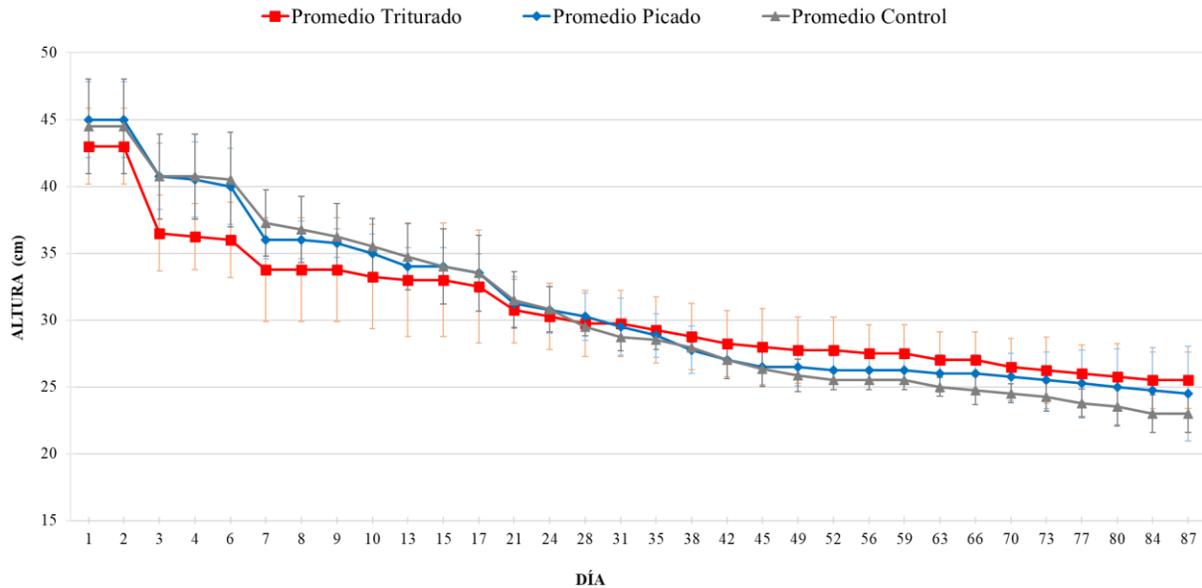
El descenso de la materia orgánica transcurre en 2 etapas fundamentales. En la primera se produce un rápido decrecimiento de los carbohidratos, transformándose las cadenas carbonadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar moléculas complejas dando lugar a los compuestos húmicos (Tomati et al., 2000; Castaldi et al., 2005). Esta primera etapa se puede identificar del día 1 al 21, en donde la pendiente de la disminución de la altura es más pronunciada, siendo más marcada en el día 2 al 3 (**Figura 12**). En esta etapa hay una mayor cantidad de sustratos disponibles para la degradación; altas temperaturas; mayor porcentaje en humedad; y por lo tanto una mayor actividad microbiana.

En la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos lábiles, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos; generalmente este último cambio no finaliza durante el tiempo que dura el compostaje (Tomati et al., 2000; Castaldi et al., 2005). Esta segunda etapa se identifica del día 24 al 87, la cantidad de sustratos fácilmente asimilables ha disminuido al igual que la actividad microbiana; las temperaturas y la humedad bajan; la disminución en la altura es más constante; se tienen pendientes menos pronunciadas (**Figura 12**). Finalmente, los sustratos ya se consumieron/transformaron en abono y el proceso de degradación termina, quedando en las pacas

el abono resultante y el material grueso o difícil de degradar, como hojarasca (por la lignina), ramas, piedras.

Figura 12

Altura promedio de las pacas con residuos triturados, picados y control



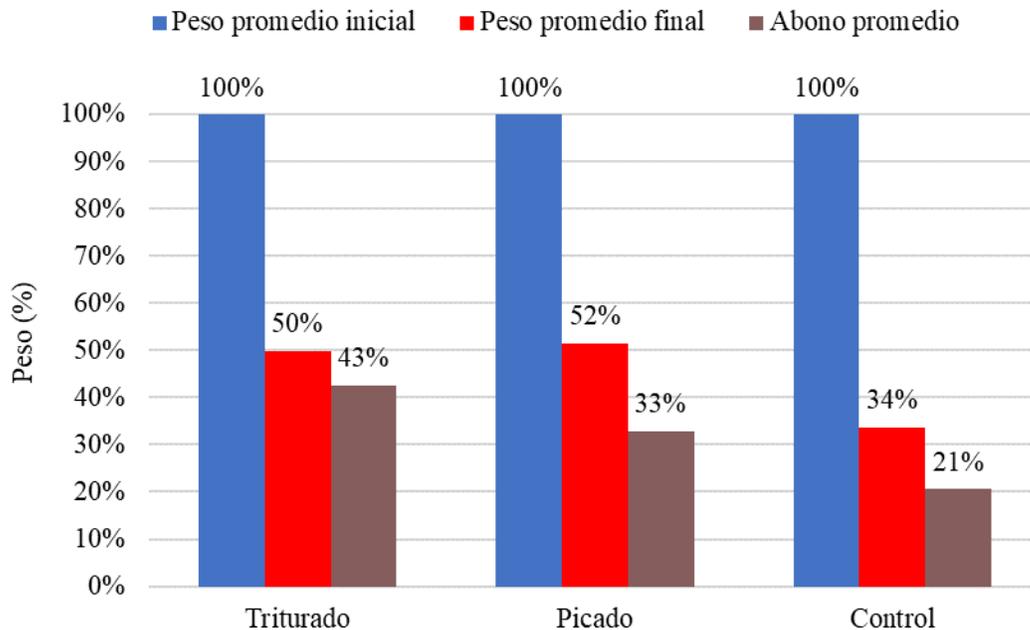
4.6 Masa

El peso promedio inicial de las pacas con residuos triturados fue de 48,125 kg, en las pacas picado fue de 34,91 kg, y en las pacas control fue de 46 kg. El peso promedio final de las pacas Triturado fue 24 kg; Picado 18 kg; Control 15,5 kg. El peso promedio de abono de las pacas Triturado fue de 20,5 kg; Picado 11,5 kg; Control 9,5 kg.

El tratamiento con el que se obtuvo una mayor cantidad de abono fue: Triturado, el 43% del peso promedio inicial de las pacas se convirtió en abono orgánico aprovechable. Luego, sigue el tratamiento Picado, en donde el 33 % del peso total inicial se transformó en abono. Finalmente, están las pacas control, las pacas sin ningún pretratamiento en sus residuos produjeron un 21% de abono, como se ilustran en la **Figura 13**.

Figura 13

Pesos promedios iniciales, finales y de abono en porcentaje obtenidos de las pacas con residuos triturados, picados y control



Las diferencias de peso entre los pesos promedios iniciales y finales (**Figura 13**) se deben a los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el interior y exterior de las pacas digestoras. Entre ellos, están: la mineralización de la materia orgánica, la pérdida de carbono (C) y nitrógeno (N), la pérdida de peso en agua, la biodegradabilidad de los sustratos de partida y la emisión de gases a la atmósfera, como el amoníaco (NH_3) y el dióxido de carbono (CO_2).

En el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi & Bertoldi, 1987). Este hecho, no es muy diferente en las pacas digestoras, ya que el porcentaje de pérdida de peso en las pacas Triturado fue de 50%; Picado 48%; Control 66%. Además, algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar sus tejidos y otros son transformados en anhídrido carbónico y agua (Haug, 1993).

También está la pérdida de peso en agua, como se vio en la **Figura 11** al inicio del experimento las pacas contenían valores de humedad de más del 70% y terminaron con valores de menos del 30%, lo que se traduce en una pérdida de peso en agua. Los organismos

descomponedores utilizaron el agua para transportar nutrientes, para su metabolismo, y fueron consumiendo los sustratos. Además, el proceso de degradación terminó en temporada seca, agudizando la pérdida de humedad en las pacas. El agua también se pudo disipar de forma de evapotranspiración, filtración en el suelo, y escurrimiento de lixiviados.

Otro factor que influyó en la pérdida de peso de las pacas (**Figura 13**), es la biodegradabilidad de los materiales de partida. No todos los materiales que tienen similar contenido de elementos son degradados de igual forma. El tipo de moléculas que componen la materia orgánica y que incluyen dichos elementos determinan la biodegradabilidad del material. La capacidad de los microorganismos para asimilar la materia orgánica depende de su habilidad para producir las enzimas necesarias para la degradación del sustrato. Un tamaño molecular elevado, así como la presencia de enlaces químicos complejos, dificulta la degradación por parte de algunos microorganismos y, por tanto, el proceso global de descomposición de la materia orgánica se produce más lentamente. Así, las moléculas orgánicas monoméricas (azúcares y aminoácidos) son más fácilmente degradadas que las poliméricas como las proteínas, los lípidos, la hemicelulosa, la celulosa y la lignina, en orden decreciente de biodegradabilidad (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

De esta forma, se podría explicar porque en el tratamiento Triturado se obtuvo una mayor cantidad de abono (43%), en este caso, un tamaño molecular pequeño favoreció su degradación por parte de los microorganismos y así mismo la conversión de más material en abono. En el tratamiento Picado donde se obtuvo un 33 % del peso inicial en abono, lo que influyó, fue que estas pacas fueron construidas con hojarasca seca, y al tener un tamaño más grande de partícula y un alto contenido de celulosa y lignina fue más difícil para los microorganismos descomponerla y transformarla en abono. El tratamiento en el que se obtuvo una menor cantidad de abono (21%) y una mayor pérdida de peso (66%) fue el control, en este caso los residuos orgánicos estaban completos, por lo que fue más notoria la pérdida de peso en agua a medida que se fue degradando la materia orgánica **Figura 12**, quedando una menor cantidad de sustratos para ser convertidos en abono.

Finalmente, está la pérdida de peso en forma de gases. En la degradación biológica de la materia orgánica parte del carbono se pierde como CO₂ por la respiración microbiana, y si hay un exceso de nitrógeno en el proceso, este se perderá en forma de lixiviados (nitratos) o en gases (amoníaco) (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

4.7 Calidad del abono

La calidad del abono obtenido en las pacas digestoras con residuos triturados, picados y control se caracterizó en base a la Norma Técnica colombiana 5167 del 2011, y la toma de resultados la llevo a cabo el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM). En los resultados obtenidos, la mayoría de los parámetros cumplió con los requisitos establecidos por la norma, como se muestra en la **Tabla 6**.

Los únicos parámetros que no cumplieron con lo establecido por la norma son: la humedad, el fósforo total y los coliformes totales. En los 3 casos de estudio la humedad fue mayor al 30%, excediendo el máximo permitido para abonos orgánicos de origen vegetal. En cuanto a los nutrientes, el fosforo total fue inferior al 1% en todos los tratamientos, aunque el tratamiento picado y control estuvieron más cerca de cumplir con dicho valor. Por el contrario, el tratamiento triturado presentó el valor más bajo de fósforo total (0,475%) y tampoco cumplió con el porcentaje mínimo requerido de potasio total. Por último, los coliformes totales en las tres muestras fueron mayores a 2400 NMP/100 g, superando el límite permisible de 1000NMP.

En general, la calidad del abono obtenido en las pacas digestoras con residuos orgánicos triturados, picados y control fue buena. El abono en los tres casos de estudio cumplió con el contenido de cenizas, el pH se mantuvo en valores neutros cercanos a 7, la densidad real no fue más de 0,6 g/cm, se cumplió con el porcentaje mínimo de retención de humedad, con la capacidad de intercambio catiónico, asimismo, con el contenido de carbono orgánico oxidable, nitrógeno y potasio total, siendo abonos que van a aportar un buen contenido nutricional. Además, el abono resultante de los tres tratamientos no contiene metales pesados, por lo que su uso no representará un peligro para las plantas, el ambiente, ni la salud. Cumplen con los requisitos microbiológicos de *Salmonella* spp (ausente), huevos de helminto viables (0), y fitopatógenos (ausente).

Tabla 6

Caracterización de la calidad del abono obtenido en pacas digestoras con residuos triturados, picados y control

PARÁMETRO	UNIDAD	REQUISITO NTC 5167 del 2011	TRITURADO	PICADO	CONTROL
Humedad	%	Máximo 30 (origen vegetal)	33,9	31,2	46,8
Cenizas	%	Máximo 60	50,8	40,6	37,1
Carbono orgánico oxidable	%	Mínimo 15	19,4	25,9	23,2
pH	pH	4 a 9	6,74	6,51	6,65
Densidad real (en base seca)	g/cm ³	Máximo 0,6	0,59	0,6	0,54
Retención de humedad	%	Mínimo 100	102,5	162,8	120,7
Capacidad de intercambio catiónico	(meq/100g)	Mínimo 30	82,5	62,9	77,5
Nitrógeno total	%	Si >1	1,72	2,13	2,32
Fósforo total	%	Si >1	0,475	0,856	0,63
Potasio total	%	Si >1	0,737	1,151	1,267
Metales pesados (máximo)	mg/kg	Arsénico (As) 41	0	0	0
		Cadmio (Cd) 39	0	0	0
		Cromo (Cr) 1200	0	0	0
		Mercurio (Hg) 17	0	0	0
		Níquel (Ni) 420	0	0	0
		Plomo (Pb) 300	0	0	0
<i>Salmonella</i> spp	Salmonella/25g	Ausente en 25 g	Ausente	Ausente	Ausente
<i>Coliformes</i> totales	NMP	<1000 NMP	>2400	>2400	>2400
Huevos de helminto viables	Huevos Helminto Viables/4g	<1 en 4g de muestra (base seca)	0	0	0
Fitopatógenos	-	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente

Nota. Los resultados en color verde cumplen con la norma NTC 5167 del 2011. Los resultados en color rojo no cumplen con la norma. Los resultados en color amarillo no cumplen con la norma, pero son cercanos a los valores requeridos.

5 Conclusiones

El tamaño de partícula de los residuos orgánicos no influyó en el tiempo de degradación o en la velocidad de descomposición de la materia orgánica en pacas digestoras, pero si se obtuvieron importantes diferencias en cuanto al abono obtenido en cada tratamiento. Las pacas digestoras con residuos triturados fue el tratamiento en el que se obtuvo una mayor cantidad de abono, el 43% del peso promedio inicial de las pacas se convirtió en abono orgánico aprovechable. El segundo tratamiento con el que obtuvo una mayor cantidad de abono fueron las pacas con residuos picados, el 33% del peso total inicial se transformó en abono. En último lugar, están las pacas control, las pacas sin ningún pretratamiento en sus residuos produjeron un 21% de abono. El método más eficiente para convertir los residuos orgánicos en abono orgánico aprovechable mediante el método de pacas digestoras, es Triturado (residuos con tamaños de 1-5 cm).

Los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH y humedad se comportaron de forma similar en los tres pretratamientos (Triturado, Picado, Control) realizados en las pacas digestoras, el tamaño de partícula de los residuos orgánicos no influyó de forma significativa. El comportamiento de la temperatura en las pacas digestoras fue semejante al del compostaje aerobio, las únicas diferencias fueron: las pacas del experimento alcanzaron más rápido la fase termófila ($T > 45^\circ$), y las temperaturas máximas registradas en la fase termófila fueron cercanas a 50°C , a diferencia del compostaje que se puede llegar a tener temperaturas de más de 60°C . Lo que al final puede incidir en los tiempos de degradación de la materia orgánica o en la efectiva eliminación de patógenos, como fueron los coliformes totales. El control del pH fue similar en los tres casos de estudio, al inicio del experimento se registraron valores entre 4,5-5,5 y luego la tendencia fue a estabilizarse en 7, terminando en dicho valor. La variación de la humedad fue idéntica en los tres casos de estudio, fue disminuyendo en el tiempo por diversos factores como: la disponibilidad de sustratos, las condiciones climáticas, la temporadas secas y lluviosas, la pérdida de agua en forma de evapotranspiración, filtración y escurrimiento de lixiviados.

La tendencia en la disminución de la altura de las pacas fue similar para los tres tratamientos (pacas con residuos Triturados, Picados y Control), pero, los porcentajes de pérdida de altura y peso fueron diferentes. Las pacas con residuos triturados fue el tratamiento que menos altura perdió (40,70 %;), y a la vez fue el método que más abono aprovechable produjo (43%). Por el contrario, las pacas control fueron el método que más altura y peso perdieron, y fue el tratamiento que menos

abono produjo (21%). Las pacas con residuos picados se mantuvieron en valores intermedios, el 33% de su peso inicial se transformó en abono. Por lo que se puede inferir que el tamaño de partícula influyó en la transformación de la materia orgánica en abono, al igual que la biodegradabilidad y el porcentaje de agua de los sustratos iniciales. Esto explicaría porque las pacas triturado perdieron menos altura y produjeron más abono, los sustratos ya estaban triturados y fácilmente asimilables para ser transformados por las bacterias y microorganismos, en cambio, en las pacas control los residuos estaban enteros, al ser atacados por los microorganismos y artrópodos se perdió más peso de los sustratos en forma agua, también se pudo perder en forma de infiltración y escurrimiento de lixiviados, quedando menos materia orgánica para ser transformada en abono. En el caso de los residuos picados (tamaño de partícula 5-10 cm) influyó la biodegradabilidad de los materiales de partida, el peso final de estas pacas se caracterizó por un alto contenido de hojarasca seca que fue difícil de degradar por los microorganismos. En conclusión, si se pretende producir una gran cantidad de abono orgánico mediante el método de pacas digestoras, las pacas con residuos triturados (tamaño de partícula 1-5 cm) son el doble de eficientes que las pacas sin ningún tratamiento en sus residuos (Control). Pero si el interés es disminuir la mayor cantidad de residuos orgánicos en volumen y peso, el tratamiento más efectivo sería el Control.

Finalmente, la calidad del abono obtenido en los tres tratamientos (triturado, picado, control) fue análoga, ya que todas las pacas contenían los mismos residuos orgánicos de partida (cascaras de frutas y verduras, borra de café, residuos de jardín), estuvieron sometidos a las mismas condiciones climáticas, y los microorganismos que realizaron el proceso de descomposición debieron ser semejantes. La mayoría de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos cumplieron con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 del 2011, a excepción del porcentaje de humedad, el fósforo total y los coliformes totales.

Referencias

- Bohórquez Santana, W. (2019). *El proceso de compostaje* (H. A. Morales Roa, A. del P. Sierra Gómez, P. E. Daza Velásquez, & D. Pachón Moreno, Eds.; 1st ed.). Universidad de La Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72>
- Breukers, L., & Puentes, F. (2021). Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo. *Banco Mundial-Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia*, 1–70.
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje*. <http://hdl.handle.net/10261/20837>
- Castaldi, P., Alberti, G., Merella, R., & Melis, P. (2005). Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Management*, 25(2), 209–213.
- Costa, F., García, C., Hernández, T., & Polo, A. (1991). *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización*. Centro de Edafología y Biología Aplicada del segura.
- Decheco Egúsqiza, A. C. (2011). Metabolismo microbiano. In *Universidad Nacional del Callao*. http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Octubre_2011/IF_DECHECO%20EGUSQUIZA_FIPA/CAPITULO%20N%BA%2005.pdf
- Delgado Rodríguez, M. (2012). *Optimización de las variables implicadas en el proceso de compostaje de RSU* (Universidad Internacional de Andalucía, Ed.). Universidad Internacional de Andalucía.
- Golueke, C. G., & Diaz, L. F. (1987). Composting and the limiting factor principle. *BioCycle (USA)*, 28(4).
- Haug, R. Tim. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers.
- IDEAM. (2018). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*.
- Jhorar, B. S., Phogat, V., & Malik, E. (1991). Kinetics of composting rice straw with glue waste at different carbon: Nitrogen ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 5(4), 297–306.
- Kiehl, E. J. (1985). *Fertilizantes organicos*. Ceres.
- Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86(2), 131–137.

-
- Melo, J. Y., & Ruiz, J. F. (2024). *INFORME DE PREDICCIÓN CLIMÁTICA A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO EN COLOMBIA*.
- Miyatake, F., & Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 97(7), 961–965.
- Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa Libros.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5167, Pub. L. No. NTC 5167 (2011).
- Osorio, N. W. (2012). pH DEL SUELO Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES. *Manejo Integral Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4).
- 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. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. <https://hdl.handle.net/10495/13416>
- Ossa Carrasquilla, L. C., Correa Ochoa, M. A., & Múnera Porras, L. M. (2020). The biodigester bale as an organic waste treatment strategy: A bibliographic review. *Produccion + Limpia*, 15(2), 71–91. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>
- Quiceno Botero, L. C. (2021). *MACROINVERTEBRADOS ASOCIADOS AL PROCESO DE DIGESTIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ CON RESIDUOS DE ALIMENTO EN PACAS BIODIGESTORAS*.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- 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. *Bioresource Technology*, 78(3), 301–308.
- Silva Pérez, G. (2012). *MANEJO LIMPIO Y SANO DE RESIDUOS BIODEGRADABLES EN PACAS DIGESTORAS SILVA*.
- Superservicios. (2023). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos (Vigencia 2022)*.
- Tchobanoglous, G. (1994). *GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS* (A. García Brage, Ed.). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.

-
- Tomati, U., Madejón, E., & Galli, E. (2000). Evolution of Humic Acid Molecular Weight As an Index of Compost Stability. *Compost Science & Utilization*, 8(2), 108–115.
- Tseng, D. Y., Chalmers, J. J., Tuovinen, O. H., & Hoitink, H. A. (1995). Characterization of a bench-scale system for studying the biodegradation of organic solid wastes. *Biotechnology Progress*, 11(4), 443–451.
- UNA Campus Sostenible. (2015). *Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost*. <http://www.documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/3818>
- Universidad de Antioquia. (2023). *ENCUESTA AMBIENTAL 2023 (vigencia 2022) UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA*.
- Zhu, N. (2006). Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Bioresource Technology*, 97(15), 1870–1875.
- Zucconi, F., & Bertoldi, M. D. (1987). Specifications for solid waste compost. *BioCycle (USA)*, 28(5).
- Zuleta Valencia, J. F. (2023, June 7). ¿Hay riesgo de colapso en el relleno sanitario La Pradera? *EICOLOMBIANO*.