



Dinámica de descomposición de residuos orgánicos a través del método Paca Biodigestora

Laura Catalina Ossa Carrasquilla

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Director

Mauricio Andrés Correa Ochoa, Doctor (PhD) en Ingeniería

Asesora

Luisa María Múnera Porras, Magíster (MSc) en Biología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Ossa Carrasquilla, 2022)
Referencia	Ossa Carrasquilla, L. C. (2022). <i>Dinámica de descomposición de residuos orgánicos a través del método Paca Biodigestora</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental

Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental (G-LIMA)

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loiza.

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.

Tabla de contenido

Presentación	5
1 La paca biodigestora como estrategia para el tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica.....	8
1.1 Introducción	9
1.2 Metodología	12
1.3 Resultados y discusión	15
1.4 Conclusiones	23
1.5 Referencias	24
2 Dinámica de las variables fisicoquímicas y microbiológicas durante la descomposición de residuos orgánicos en pacas biodigestoras	28
2.1 Introducción	29
2.2 Metodología	31
2.3 Resultados y discusión	35
2.3.1 Dinámica de los parámetros fisicoquímicos in situ.....	35
2.3.2 Dinámica de los parámetros fisicoquímicos <i>ex situ</i>	38
2.3.3 Dinámica de los parámetros microbiológicos	44
2.3.4 Relación entre las variables fisicoquímicas y microbiológicas.....	48
2.3.5 Cambios en la concentración de la materia orgánica durante el proceso de descomposición.....	51
2.4 Conclusiones	54
2.5 Agradecimientos.....	55
2.6 Referencias	55
3 Análisis cromatográfico, fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico del abono obtenido de las pacas biodigestoras	60
3.1 Introducción	61
3.2 Metodología	64

3.3	Resultados y discusión	69
3.3.1	Análisis cromatográfico	69
3.3.2	Análisis fisicoquímico.....	72
3.3.3	Análisis microbiológico	76
3.3.4	Parámetros fitotóxicos.....	77
3.4	Conclusiones	78
3.5	Referencias	79
4	Gestión integral de residuos orgánicos mediante la tecnología de la paca biodigestora: Una experiencia en la Universidad de Antioquia, Colombia	84
4.1	Introducción	85
4.2	GIRO Sostenible	87
4.3	Caso GIRO Sostenible UdeA 2019-2020.....	89
4.4	Componentes operacionales GIRO Sostenible UdeA.....	90
4.4.1	Tratamiento integral	91
4.4.2	Aprovechamiento ecológico.....	93
4.4.3	Estrategias de educación ambiental.....	95
4.4.4	Investigación aplicada	96
4.5	Conclusiones	96
4.6	Referencias	98

Presentación

El manejo integral de los residuos orgánicos representa un reto para la humanidad, aun cuando en la actualidad se vienen aplicando métodos que permiten su tratamiento y aprovechamiento persisten limitaciones que reducen su efectividad. Debido a que las técnicas convencionales que se aplican no solo están alejadas de realizar un manejo integral, sino también de promover el cuidado de la salud pública y ambiental debido a los impactos negativos que generan en el ambiente como proliferación de plagas, generación de gases de efecto invernadero, olores, entre otros. Sumado a lo anterior, la tasa de crecimiento de la producción mundial de alimentos y la población, especialmente en los sistemas urbanos, incrementa año tras año y los valores de crecimiento son de difícil predicción. Frente a la importancia de encontrar una solución a este problema, la evaluación de nuevas tecnologías como la paca biodigestora y la adaptación de los procesos a las características del contexto, diversifica las posibilidades para la gestión integral de los residuos orgánicos, permite la incorporación de estrategias para la mitigación de los problemas ambientales y el ejercicio de una responsabilidad ambiental y sostenible.

En Colombia, la implementación de la paca biodigestora como tecnología potencial para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos, se ha popularizado en las última década. Principalmente, porque desde el accionar social se ha concebido como un método que fomenta el trabajo colectivo y comunitario, una estrategia que visibiliza el deber de las personas de construir ambientes sanos y habitables, en donde la conciencia ambiental se cimenta desde la participación activa de la ciudadana y se orienta en procesos que conllevan hacia la mitigación de los impactos, la protección de los recursos naturales y una mejor calidad de vida, pero como una labor compartida entre la responsabilidad de la sociedad y los gobiernos locales. Por otro lado, el mecanismo de la paca biodigestora permite incrementar el aprovechamiento de los residuos orgánicos enmarcando el concepto de economía circular dentro de la sostenibilidad, puesto que impulsa la aplicación de buenas prácticas ambientales desde la separación en la fuente, la generación de nuevos productos como el abono para la reincorporación en el suelo, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la eliminación de la disposición final en los rellenos sanitarios y el tratamiento controlado, donde los residuos orgánicos actúan como un recurso con valor agregado, que junto al uso racional y eficiente de los materiales propician la reducción en la generación de

los mismos. Lo anterior, no solo alude al beneficio ambiental general, sino también a una medida de mitigación del cambio climático, una propuesta que aporta a la construcción de comunidades sostenibles y al fomento de procesos de agricultura ecológica en el contexto rural y urbano.

Sin embargo, a pesar de las bondades que se le atribuyen a la tecnología de la paca biodigestora desde las percepciones sociales y empíricas, el conocimiento científico sobre la dinámica de descomposición del material biodegradable que se procesa mediante este mecanismo es insipiente, para ser considerado en las estrategias o métodos de tratamiento biológico de los Planes de Gestión Integral de los Residuos Sólidos a nivel municipal, regional o nacional. En este sentido, la presente investigación busca abordar desde las concepciones científicas una primera aproximación a responder la pregunta sobre *cómo es la dinámica de descomposición de los residuos de fruta, borra de café y hojarasca en la paca biodigestora*, con el fin de ser utilizada como un método alternativo o complementario para el tratamiento y/o aprovechamiento de los residuos orgánicos, que logre una interpretación verificable basada en la demostración e interpretación de los fenómenos de la naturaleza.

Las experiencias de investigación se realizaron en el marco del proyecto para la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos hacia la sostenibilidad de la Universidad de Antioquia (GIRO Sostenible UdeA) ejecutado en el periodo 2019-2020, el cual tuvo como objeto realizar la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos (frutas, borra de café y hojarasca), que son producidos en el Campus Universitario, mediante la aplicación del método de la paca biodigestora para el tratamiento integral y el aprovechamiento ecológico, articulando diferentes procesos de educación ambiental e investigación aplicada.

El informe se estructuró en cuatro (4) capítulos, en el primero se realizó una revisión bibliográfica, aplicando el método Proknow-C, para conocer el estado del conocimiento sobre la aplicación de la paca biodigestora como estrategia para el tratamiento de residuos orgánicos. En el segundo capítulo, se evaluaron los parámetros fisicoquímicos y se caracterizaron algunos grupos microbianos presentes durante 120 días de la descomposición. Adicional, se determinó la relación entre los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y la concentración de materia orgánica en el proceso. En el capítulo tres, se evaluó la calidad y estado de madurez del abono o subproducto

resultante de la transformación de los residuos orgánicos mediante un análisis cromatográfico, fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico. Finalmente, en el capítulo cuatro, se socializó la experiencia del proyecto Giro Sostenible UdeA 2019-2020 llevado a cabo en el Campus Principal de la Universidad de Antioquia, el cual responde a la necesidad de implementar métodos económicos, ecológicos y socialmente aceptados como la paca biodigestora para maximizar el aprovechamiento de los residuos orgánicos en la fuente de generación.

Se espera que a partir de esta investigación, se logren algunas claridades sobre el funcionamiento del sistema y posteriormente, se planteen nuevas preguntas de análisis que permitan continuar sumando evidencia para describir la dinámica de descomposición utilizando otros residuos orgánicos, en otras zonas de vida y variando las dimensiones físicas del mecanismo. Así mismo, se considera importante que posterior a estas interpretaciones se puedan establecer diferentes métodos de optimización de la paca biodigestora, en términos de minimizar el tiempo de descomposición de los residuos orgánicos y maximizar la calidad y cantidad del abono final.

1 La paca biodigestora como estrategia para el tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica¹

Resumen

La paca biodigestora, también conocida como paca digestora Silva, es una tecnología para el manejo integral de los residuos orgánicos, un proceso que permite la degradación biológica de la materia orgánica hasta abono o sustrato, un material orgánico que contiene nutrientes biodisponibles para las plantas y organismos que benefician la calidad del suelo. El objetivo del presente estudio fue identificar y analizar la producción científica e investigaciones desarrolladas sobre las pacas biodigestoras. Para lograrlo, se aplicó el método Proknow-C que consiste en seleccionar un portafolio bibliográfico y desarrollar en él un análisis bibliométrico y sistémico, el primero para identificar los autores y las revistas que han publicado, las universidades que han investigado, el periodo de publicación y las palabras claves utilizadas; el segundo para analizar las investigaciones a profundidad e identificar los objetivos, las discusiones y los resultados presentados en los artículos. Las bases de datos exploradas fueron Google Scholar, Dialnet, Scielo, Redalyc, Science Direct y Scopus. Asimismo, se rastrearon los repositorios bibliográficos de la Universidad de Antioquia, Corporación Universitaria la Sallista, Universidad de Medellín, Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Pontificia Bolivariana. Se identificaron 12 artículos que conformaron el portafolio bibliográfico de investigaciones que se han desarrollado sobre las pacas biodigestoras. En el 2015 y 2017 es el periodo con mayor cantidad de publicaciones, tres por año. La revista más destaca es Producción + Limpia. Aun cuando, diferentes autores han enfocado sus investigaciones en analizar desde la variación de los parámetros fisicoquímicos cómo es el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en las pacas biodigestoras y evaluar la calidad del producto final desde las características fisicoquímicas, microbiológicas, fitotóxicas y nutricionales, la información científica sobre el método es incipiente, lo cual limita su comprensión y posterior aplicación. A pesar de ello, varios autores han coincidido en que la paca biodigestora es un método viable para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos ya que evita

¹ Artículo publicado en la revista Producción + Limpia.

Ossa-Carrasquilla, L. C., Correa-Ochoa, M. A., & Múnera-Porras, L. M. (2020). *La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica*. Producción + Limpia, Vol. 15, pp. 71–91. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>

los impactos negativos en el ambiente, protege la salud pública y fomenta prácticas ambientales sostenibles desde la participación comunitaria.

Palabras clave: abono orgánico, gestión integral, paca biodigestora, Proknow-C, residuos orgánicos.

1.1 Introducción

El tratamiento adecuado de los residuos orgánicos (RO) se ha convertido en un tema de interés en la investigación debido a que representa uno de los problemas y necesidades recurrentes en los planes de gestión ambiental de los territorios. Con el incremento en la generación de RO los retos socioambientales son inminentes, y esto se debe principalmente al acelerado desarrollo social, el crecimiento continuo de la población y por ende el aumento en la demanda de recursos. Las proyecciones sobre la generación de residuos a 2050 son crecientes, tendencia que de mantenerse sin tomar medidas al respecto incrementarían en un 70 % los desechos a nivel mundial, es decir, cerca de 3400 millones de toneladas al año (Kaza et al., 2018). El manejo inadecuado de los RO repercute en el deterioro de la calidad ambiental y la salud pública, aumentando los focos de contaminación en el agua, suelo y aire. Por otro lado, el requerimiento de nuevos sitios de vertedero, incineración o disposición final, y el diseño y aplicación de estrategias para su saneamiento conllevan a un aumento en la inversión económica por parte de los gobiernos (Wainaina et al., 2020). En consecuencia, la aplicación de procesos sostenibles para la gestión integral de los RO, más que una necesidad es la posibilidad de desarrollar y aplicar tecnologías ecológicas que conlleven a la protección del ambiente.

De acuerdo con Paes et al. (2019) los gobiernos locales suelen ser responsables del sistema de manejo de residuos y deben asumir el desafío de proporcionar un modelo eficaz a la población. Para ello, es necesario el cumplimiento estricto de las políticas y los planes de gestión que tienen como propósito maximizar el aprovechamiento de los residuos y eliminar, disminuir o mitigar los impactos socioambientales negativos que producen. Por medio de la *Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos -GIRS-* formulada desde 1998 por el Ministerio del Medio Ambiente (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), en Colombia se ha considerado

como responsabilidad de los municipios y ciudades la ejecución de una GIRS que promueva el cuidado del medio ambiente y la protección de la salud pública, y vincule un manejo diferenciado de los residuos aprovechables y no aprovechables, desde las diferentes etapas: reducción en el origen; aprovechamiento y valorización; tratamiento y transformación; así como la disposición final controlada.

En el caso de los RO, el tratamiento o transformación permite contribuir con la mitigación de los efectos del cambio climático, la reducción de contaminación relacionada con problemas de salud, la conservación de los recursos naturales y el desarrollo social, económico y ambiental (Dhanya et al., 2020). Comúnmente, en los métodos de tratamiento se implementan procesos biológicos de descomposición anaerobia o aerobia, con el propósito de transformarlos para obtener un subproducto estable y maduro (Moreno & Moral, 2008; Starovoytova, 2018). Según Castells et al. (2012) ambos mecanismos de digestión son claves en una estrategia de reciclado de nutrientes, ya que por separado o combinados permiten su conservación, es decir, los macro y micronutrientes permanecen en el ecosistema cambiando tan solo su estado de oxidación.

Existen varias tecnologías para el tratamiento de los RO, el compostaje y los biodigestores son los métodos más utilizados, en los cuales se llevan a cabo procesos de descomposición biológica donde la participación de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes es esencial (Keng et al., 2020). En términos de la gestión ambiental, el tratamiento adecuado de los RO dependerá de las condiciones óptimas del medio, que influyen directamente el desarrollo de los organismos vivos y garantizan que se pueda cumplir a cabalidad la función de reciclar la materia orgánica. En el caso del compostaje por ejemplo, por su condición aeróbica requerirá de una oxigenación permanente para evitar malos olores o generación de gases tóxicos, regular la temperatura y el pH en el sistema (Román et al., 2013); en estas condiciones los microorganismos aerobios transforman la materia orgánica en biomasa celular y en compuestos oxidados (Castells et al., 2012). Por su parte, los biodigestores requieren de una condición totalmente anaerobia, donde los niveles de oxígeno sean nulos favoreciendo metabolismos anaerobios como la metanogénesis y así, el metano producido permite su uso como potencial energético (López, 2003).

Actualmente, se vienen evaluando otro tipo de tecnologías alternativas que posibilitan el tratamiento integral de los RO, como es el caso de la paca biodigestora (ver Gráfico 1-A), la cual permite convertir la materia orgánica en abono mediante un proceso de fermentación (Silva, 2012). La principal diferencia entre los mecanismos aeróbico y anaeróbico con la paca biodigestora, es que este último requiere una distribución especial y una compactación de los materiales incorporados para extraer la mayor cantidad de oxígeno presente (ver Gráfico 1-A1 y A2), sin provocar condiciones anaeróbicas estrictas, ya que el proceso de descomposición se lleva a cabo a la intemperie (ver Gráfico 1-A3), lo que posibilita el intercambio de materia y energía con el entorno. Por otro lado, debido a las facilidades de uso, lo económico que resulta la aplicación del proceso y las diferentes posibilidades de aprovechamiento de las pacas biodigestoras durante (ver Gráfico 1-B1) y después del proceso de descomposición de los RO (ver Gráfico 1-B2). Este mecanismo ha ganado popularidad y aceptación social, principalmente en Colombia donde se ha desarrollado, y en otros países (Silva, 2018). Aun así, persiste una desinformación sobre la aplicación de las pacas biodigestoras para el tratamiento de los RO y el reconocimiento social y científico aún es incipiente, por lo tanto, el propósito de este estudio fue realizar una revisión de literatura sobre las pacas biodigestoras para así brindar una compilación de información que permita conocer los avances en el tema y el vacío del conocimiento, lo cual podrá utilizarse en futuras investigaciones o en la toma de decisiones con relación a la gestión integral de los residuos orgánicos.

Gráfico 1

Proceso de fabricación de la Paca Biodigestora (A) y estrategias de aprovechamiento de los residuos orgánicos (B).



Nota. Fuente elaborado por los autores.

1.2 Metodología

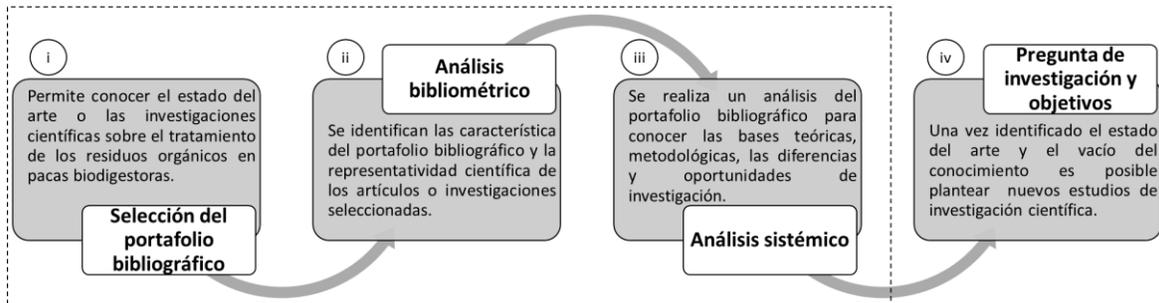
El presente estudio clasificado como exploratorio y descriptivo, tiene como objetivo identificar y caracterizar la producción científica o estado del arte sobre el manejo de residuos orgánicos en pacas biodigestoras. Para ello se realizó una revisión bibliométrica y un análisis sistémico, el primero para conocer los autores y las revistas que han publicado sobre el tema y el segundo para identificar los objetivos, las discusiones y los resultados presentados en los artículos.

El instrumento utilizado para orientar la construcción del estado del arte sobre las pacas biodigestoras fue el Proceso de Desarrollo del Conocimiento - Constructivista (Proknow-C), el cual permite, recopilar información sobre un tema específico a partir de los intereses y límites de la investigación, analizar la información para generar un portafolio bibliográfico relevante e identificar oportunidades de investigación a partir del vacío de conocimiento (Ensslin et al., 2014; Mauro et al., 2018). Tal como se observa en el Gráfico 2, el método aborda cuatro etapas: (i)

selección de un portafolio bibliográfico sobre el tema de investigación; (ii) análisis de los aspectos bibliométricos básicos; (iii) análisis sistémico y (iv) definición de la pregunta y objetivo de la investigación.

Gráfico 2

Etapas del Proceso de Desarrollo del Conocimiento - Constructivista (Proknow-C).

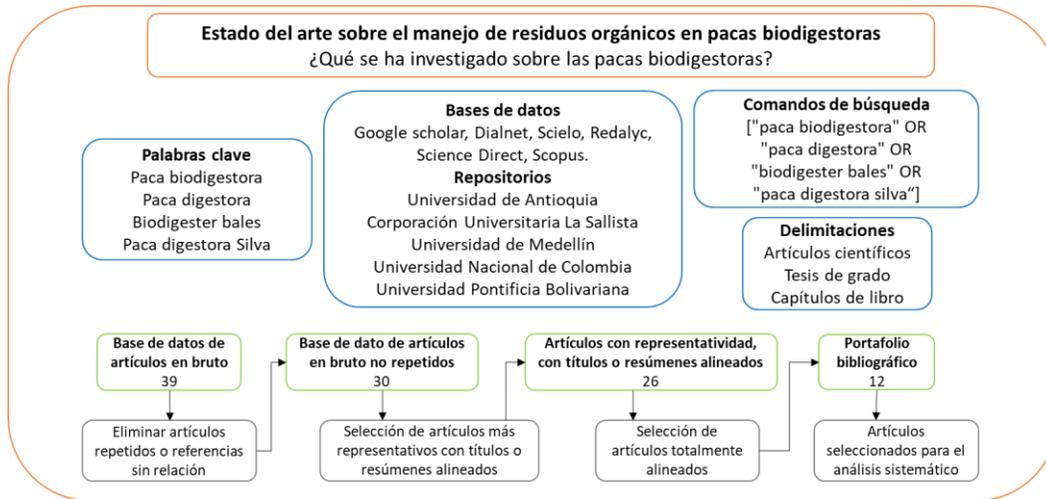


Nota. Fuente adaptado y traducido de (Ensslin et al., 2014; Mauro et al., 2018)

Para lograr el objetivo de esta investigación, se siguieron los procedimientos de las etapas uno a las tres del ProKnow-C. Inicialmente, la selección del portafolio bibliográfico se realizó con base a la metodología descrita por Ensslin et al. (2014); Matos et al. (2019); Mauro et al. (2018). Como se muestra en el Gráfico 3, el proceso comenzó con la definición del tema de investigación, las palabras clave, la identificación de las bases de datos y repositorios donde se generaban resultados de búsqueda sobre el tema, la selección de los comandos de rastreo como “OR” que permite encontrar todo el universo de posibilidades de las palabras claves seleccionadas, y finalmente las delimitaciones utilizadas para reducir la búsqueda a tres tipos de publicaciones, como artículos científicos, tesis de grado y capítulos de libro.

Gráfico 3

Proceso de selección del portafolio bibliográfico.



Nota. Adaptado de (Ensslin et al., 2014; Matos et al., 2019; Mauro Silveira et al., 2018)

Una vez completado el proceso de búsqueda, se obtuvo una base de datos de artículos inicial o en bruto, los cuales se agruparon utilizando el software Mendeley versión 1.19.4. Como se observa en el Gráfico 3, la base de datos inicial se filtró eliminando los artículos repetidos o sin relación y se seleccionaron solo aquellos que tenían relación con el tema, es decir, los que contenían en el título, resumen o cuerpo del texto las palabras claves seleccionadas. Este procedimiento permitió identificar el conjunto de investigaciones realizadas sobre las pacas biodigestoras y conformar el portafolio bibliográfico, en el cual se aplicó el análisis bibliométrico y sistémico.

El análisis bibliométrico se realizó para identificar las características de los artículos del portafolio bibliográfico y la representatividad científica de los mismos en términos de conocer en qué revistas se ha publicado o en qué universidades se ha investigado sobre las pacas biodigestoras, qué autores han publicado, cuál ha sido el periodo de publicación y cuáles han sido las palabras clave utilizadas (Ensslin et al., 2014; Silva Da Rosa & Silva, 2017). Finalmente, se llevó a cabo el análisis sistémico de los textos del portafolio bibliográfico con base a la metodología propuesta por Chaves, et al. (2012); Rodrigues-Vaz et al. (2014), la cual consiste en analizar los textos completamente para identificar el tema de investigación, los objetivos, la metodología, los principales resultados y las recomendaciones futuras de los autores.

1.3 Resultados y discusión

El instrumento Proknow-C fue utilizado para guiar el desarrollo metodológico del presente estudio, el barrido bibliográfico se realizó en seis bases de datos y cinco repositorios de universidades de Medellín como se mostró en la Grafico 3, se encontraron 39 resultados de investigación, entre artículos científicos y tesis de grado de diversas áreas como ingeniería y salud pública. Luego de eliminar los elementos repetidos de la base de datos de artículos iniciales, se obtuvo un total de 30 resultados, de los cuales se seleccionaron 26 por tener relación con el tema. Finalmente, con la lectura de los títulos y resúmenes, se distinguieron 12 publicaciones que han investigado y aplicado la tecnología de las pacas biodigestoras, los cuales conformaron el portafolio bibliográfico, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1

Portafolio bibliográfico sobre las pacas biodigestoras.

Título	Autor	Año de publicación	Revista o repositorio	Tipo de publicación
Técnica de descomposición de residuos forestales y heces de establo con pacas digestoras: aspectos fisicoquímicos, ambientales y sanitarios. Centro Educativo Conquistadores, Medellín.	Ardila Delgado, Jeyme Liset; Cano Córdoba, Jonathan	2011	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento de San Antonio de Prado.	Posada Marín, Ana María	2015	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos, para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.	Arteaga Restrepo, Cristian David; Castaño Velásquez, Sebastián	2015	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios	Ardila Delgado, Jeyme Liset; Cano Córdoba, Jonathan; Silva Pérez, Guillermo; López Arango, Yolanda	2015	Revista Producción + Limpia	Artículo científico
Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia.	Ossa Carrasquilla, Laura Catalina	2016	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México	Rivera Espinosa, Ramón; Ossa Carrasquilla, Laura Catalina	2017	Revista textual	Artículo científico

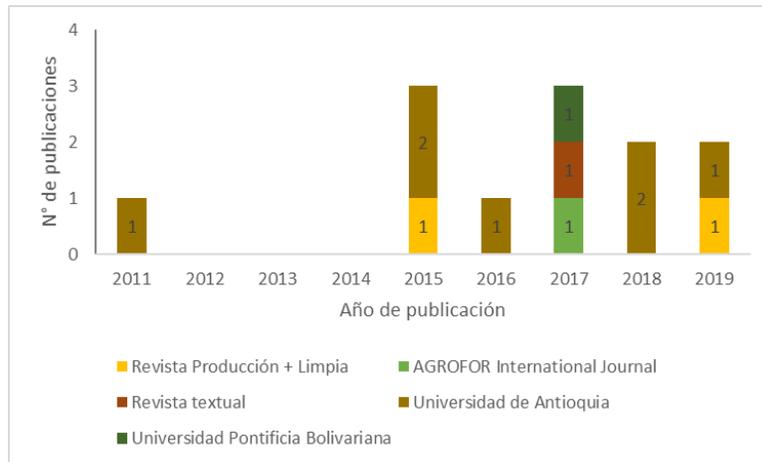
Título	Autor	Año de publicación	Revista o repositorio	Tipo de publicación
Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues	Velázquez Cigarroa, Erasmo; Ossa Carrasquilla, Laura Catalina; Jarquín Sánchez, Natalia; Victorino Ramírez, Liberio	2017	AGROFOR International Journal	Artículo científico
Implementación de un sistema integral de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos en el Centro Educativo Rural Josefa Romero, Municipio de Dabeiba	Arenas Osorno, Cristian Yair	2017	Universidad Pontificia Bolivariana	Tesis de grado posgrado
Caracterización fisicoquímica de las pacas biodigestoras en el proceso de tratamiento de la barra de café generada en la Universidad de Antioquia	Cardona Sánchez, Juan Diego	2018	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia mediante pacas biodigestoras	Pulgarín Muñoz, Carlos Esteven	2018	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Desarrollo de alternativas para el manejo adecuado de residuos sólidos y orgánicos en el municipio de San Pedro de Urabá desde diversos espacios educativos.	Ochoa Arcila, Ángel David	2019	Universidad de Antioquia	Tesis de grado pregrado
Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras	Pulgarin Muñoz, Carlos Esteven; Wills Betancur, Beatriz Amparo	2019	Revista Producción + Limpia	Artículo científico

Nota. Fuente elaborado por los autores.

El análisis bibliométrico de los textos e investigaciones que conforman el portafolio bibliográfico sobre las pacas biodigestoras muestra que cuatro publicaciones corresponden a artículos científicos, siete a tesis de grado de pregrado y uno a tesis de grado de posgrado. En el Gráfico 4, se muestra la distribución de las publicaciones por fechas y las revistas o repositorios donde se han divulgado. En el año 2011 se realizó la primera publicación en la Universidad de Antioquia, sumando un total de siete investigaciones desarrolladas en esta institución en el periodo de observación. En el 2015 y 2017 se desarrollaron el mayor número de publicaciones, tres en cada año. Con respecto a las revistas analizadas, se destacan las siguientes: Producción + Limpia con dos publicaciones, las cuales corresponden a los resultados de investigación obtenidos en las tesis de grado de Pulgarin (2018) y Ardila & Córdoba (2011), la revista Textual y AGROFOR International Journal con una publicación cada una.

Gráfico 4

Distribución de la cantidad de publicaciones por año y las revistas o repositorios donde se ha publicado sobre las pacas biodigestoras

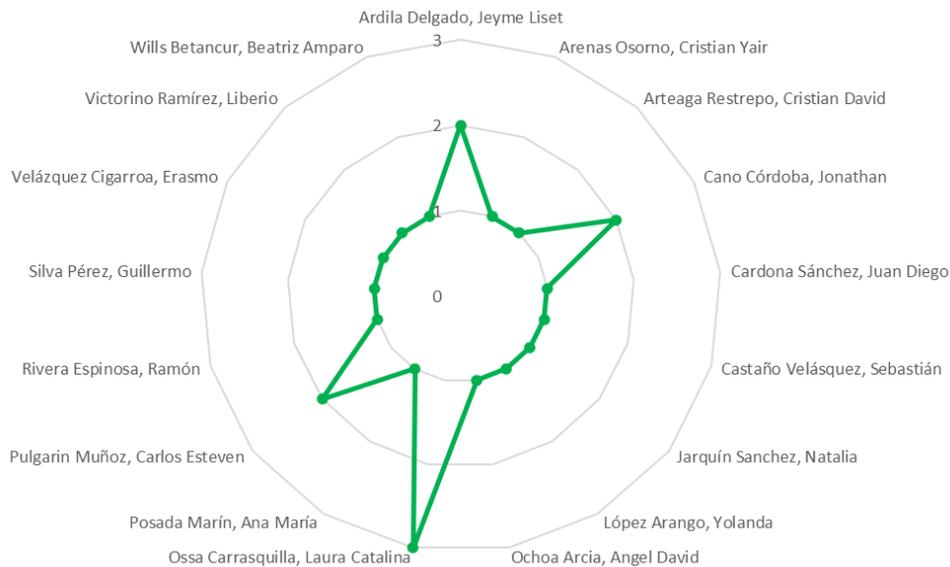


Nota. Fuente elaborado por los autores.

En el análisis bibliométrico se encuentra que uno de los autores, Ossa Carrasquilla, Laura Catalina, destaca en 3 artículos en el portafolio bibliográfico, seguido de Ardila Delgado, Jeyme; Cano Córdoba, Jonathan y Pulgarín Muñoz, Carlos Esteven con participación en dos publicaciones cada uno, tal como se observa en el Gráfico 5.

Gráfico 5

Número de publicaciones en revistas o repositorios realizadas por cada autor.



Nota. Fuente elaborado por los autores.

En las doce publicaciones analizadas del portafolio bibliográfico, tres no tenían el ítem de palabras clave, por lo tanto, el análisis se restringió en aquellas que si lo presentaron. En total se identificaron 41 palabras clave, de las cuales 6 se repitieron más de una vez, tal como se observa en la Tabla 2. La palabra clave “abono orgánico” fue la más utilizada, con tres ocurrencias. Seguido, están las palabras clave “materia orgánica”, “pacas biodigestoras”, “pacas digestoras”, “reciclaje” y “residuos orgánicos”, con dos repeticiones cada una.

Tabla 2

Palabras clave de las publicaciones analizadas en el portafolio bibliográfico.

Palabras clave	Repeticiones	Palabras clave	Repeticiones
Abono orgánico	3	Lodos biológicos	1
Ambiental	1	Manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos	1
Aprovechamiento de residuos orgánicos	1	Materia orgánica	2
Biodigester bale	1	Organic fertilizer	1
Biodigestora	1	Orgánicos	1
Biotecnología	1	Paca	1
Borra de café	1	Pacas	1
Compost	1	Pacas biodigestoras	2
Compostaje	1	Pacas digestoras	2
Compostaje a cielo abierto	1	Pacas digestoras silva	1
Degradación biológica	1	Reciclaje	2
Descomposición	1	Residuos	1
Descomposición anaeróbica	1	Residuos orgánicos	2
Didáctica	1	Residuos vegetales	1
Digestión anaerobia	1	School	1
Educación	1	Sustainability	1
Educación ambiental	1	Técnica limpia.	1
Fauna	1	Tratamiento ecológico.	1
Fermentación	1	Universidad de Antioquia	1
Flora	1	Zonas verdes	1
Gestión ambiental	1		

Las repeticiones de cada palabra clave se usaron para bosquejar un gráfico de nubes (Grafico 6), el cual agrupa las palabras por temas y establece un tamaño de fuente para cada palabra según el peso o nivel de importancia de la variable.

Gráfico 6

Gráfico de nubes de las palabras clave encontradas en las publicaciones analizadas en el portafolio bibliográfico.



Nota. Fuente elaborado por los autores.

El análisis sistémico del portafolio bibliográfico (Tabla 1) permitió identificar algunos criterios de las publicaciones como: el tema de investigación, los objetivos, la metodología, los principales resultados y las recomendaciones futuras de los autores. Las publicaciones analizadas son en general estudios exploratorios y descriptivos que abordan diferentes temas como: el tratamiento de los residuos orgánicos, la variación de los parámetros fisicoquímicos durante el proceso de descomposición, la evaluación de la calidad del abono orgánico resultante, la generación de experiencias de educación ambiental y los impactos socioambientales del método. Las investigaciones tienen en común la aplicación de las pacas biodigestoras para descomponer diferentes tipos de residuos orgánicos, aquellos que han sido procesados son: residuos forestales o vegetales (césped, hojas, tallos, chamizas, entre otros), residuos de alimentos (legumbres, frutas, cascara, borra de café, entre otros), residuos de animales (estiércol o heces de establo) y lodo biológico proveniente de una planta de tratamiento de agua residual.

Algunos autores han estudiado el tratamiento de los residuos orgánicos en pacas biodigestoras a través de un análisis comparativo con el compostaje. Posada (2015) evaluó la eficiencia de los dos procesos a partir del monitoreo de las variables temperatura, pH, humedad y volumen durante la transformación de residuos vegetales, de legumbres y orgánicos domésticos, en una zona rural del municipio de San Antonio de Prado, y la calidad del producto final (abono) en ambos sistemas, al tercer mes de descomposición, mediante el análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico en laboratorio. Arenas (2017), por su parte, comparó los procesos de compostaje a cielo abierto y pacas biodigestoras, para determinar las variaciones de la temperatura, pH y humedad durante la descomposición de residuos orgánicos generados en una institución educativa rural del municipio de Dabeiba, y establecer el sistema más eficiente en términos de la cantidad de abono producido.

Diferentes investigadores consideraron la paca biodigestora como su unidad experimental, algunos las ensamblaron con poda de jardín y estiércol, ubicaron dos pacas bajo techo y dos a la intemperie, a las cuales les evaluaron los cambios del pH, humedad, peso, temperatura, volumen, lixiviados gases, microorganismos, artrópodos y presencia de roedores durante el proceso de descomposición, y describieron la calidad del abono resultante por medio de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos (Ardila & Cano, 2011; Ardila, Cano, Silva, & López, 2015). Otros analizaron las variaciones de la temperatura, pH, humedad y altura en el tiempo de biodegradación y compararon los resultados de laboratorio con los índices de calidad establecidos por la Norma Técnica Colombiana 5167 (2011) para evaluar las características del abono obtenido de pacas biodigestoras ensambladas a la intemperie. Ossa (2016) por ejemplo, estudió el proceso en tres pacas de 1 m³ con iguales proporciones (1:1) de residuos vegetales (hojarasca, poda, chamizos) y residuos de cocina (cáscaras de frutas y verduras); Pulgarin & Wills (2019) hicieron el monitoreo de cuatro pacas biodigestoras de 0,125 m³ construidas con residuos vegetales, de cocina y diferentes concentraciones de lodos biológicos (0, 50, 75 y 100 %); y Cardona (2018) realizó un experimento de seis pacas de 1 m³ con 50 % de hojarasca cada una y tres diferentes proporciones de borra de café y residuos de cocina (1:0), (0,5:0,5) y (0,15:0,35), tres de las pacas fueron construidas con borra de café ordinario y las otras tres con borra de café especial.

Arteaga & Castaño (2015) a partir de la aplicación de las pacas biodigestoras realizaron un proceso de recolección de información cualitativa y cuantitativa para demostrar la aceptación social y la

viabilidad del método como alternativa de tratamiento de los residuos orgánicos en el campus principal de la Universidad de Antioquia. Por su parte, Rivera & Ossa (2017) luego del desarrollo de una serie de talleres teórico prácticos dirigidos a estudiantes de nivel medio superior y universitario del estado de México, realizaron un proceso de sistematización de experiencias para analizar la función de las pacas biodigestoras como componente principal de herramientas metodológicas basadas en el aprender haciendo, que buscan sensibilizar y motivar buenas prácticas ambientales desde la gestión integral de los residuos orgánicos. En el caso de Ochoa (2019) mediante la elaboración de pacas digestoras buscó promover el reciclaje de nutrientes orgánicos en los contextos educativos del municipio de San Pedro de Urabá para motivar el aprovechamiento en la fuente.

Los hallazgos más relevantes de las investigaciones permiten identificar algunas características del proceso de descomposición de los residuos orgánicos en la paca biodigestora, la calidad del abono orgánico resultante y la respuesta social hacia la aplicación del método. De acuerdo con Ardila et al. (2015); Ossa (2016) y Posada (2015) la paca biodigestora de un metro cúbico procesa entre 500 a 600 Kg de residuos orgánicos, no genera malos olores ni proliferación de plagas, inhibe la generación de gases tóxicos, no requiere infraestructura y funciona a la intemperie. La evolución de la temperatura durante el proceso de descomposición resultó ser similar al proceso de compostaje, Arenas (2017) y Posada (2015) evidenciaron la presencia de fases mesófilas, termófilas, de estabilización y maduración, a diferencia de que la temperatura máxima se alcanza más tarde y la tasa de disminución es más lenta en la paca biodigestora; asimismo, describieron que los cambios en el pH es similar en los dos procesos, a diferencia del contenido de humedad. La fase termófila coincide con los niveles más bajos de pH y luego su variación se mantiene en un rango cercano a la neutralidad. En cambio, la variación del contenido de humedad es menor en la paca biodigestora, al ser un sistema cerrado y sin ventilación mantiene condiciones de saturación en el centro, la cual disminuyen en la superficie.

La relación inversa entre el cambio en la altura y el tiempo de descomposición permiten predecir el estado del abono orgánico resultante. Diferentes autores consideran que el tiempo requerido para obtener un sustrato estable y maduro es de al menos seis meses, justo cuando la paca biodigestora de un metro cúbico alcanza una altura menor a los 50 cm (Ardila et al., 2015; Cardona, 2018;

Pulgarin & Wills, 2019; Velázquez et al. 2017). Con relación a las características fisicoquímicas, microbiológicas, fitotóxicas y nutricionales, el abono que se obtiene cumple con los estándares de calidad de la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (2011) lo que permite considerar su incorporación en el suelo, aportando nutrientes para las plantas y mejorando las propiedades biológicas y fisicoquímicas. De acuerdo a los análisis microbiológicos, el abono maduro se encuentra libre de patógenos y de compuestos contaminantes o fitotóxicos (Ardila et al., 2015b; Velázquez et al., 2017). Indiferente de los residuos utilizados, Cardona (2018); Ossa (2016); Posada (2015) y Pulgarin & Wills (2019) encontraron que los contenidos de *Salmonella* sp., Enterobacterias, nemátodos y protozoos cumplen con los niveles mínimos establecidos por la NTC 5167/2011, lo que posibilita su uso sin afectar el desarrollo de las plantas o la salud del suelo.

De acuerdo con Posada (2015) en el contenido de nutrientes, el compostaje y las pacas presentaron algunas diferencias significativas, en el primero se presentaron niveles superiores al 1 % de Ca, P, K, mientras que en el segundo se encontró que solo el Ca y K superaron el 1 %. Aun cuando los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fototóxicos fueron similares en ambos métodos, el proceso de mineralización es más rápido en el compostaje, pero la eficiencia con relación a la cantidad de abono orgánico obtenido es 30 % mayor en las pacas biodigestoras (Arenas, 2017).

Según Velázquez et al. (2017) una de las bondades de la paca es que permite su aprovechamiento durante el proceso de descomposición, por medio del desarrollo de huertas, jardinería o paisajismo. Ossa (2016) menciona que mientras se digiere un metro cúbico de residuos orgánicos se obtiene un metro cuadrado de suelo productivo, lo que representa una posibilidad de desarrollar proyectos de siembra de hortalizas, aromáticas y medicinales paralelo el proceso de biodegradación del material incorporado.

En este sentido, la paca biodigestora aparte de ser una tecnología para el reciclaje de los residuos orgánicos, es un mecanismo que vincula la participación comunitaria y la preservación de los recursos naturales en los ecosistemas urbanos y rurales (Arteaga & Castaño, 2015; Ochoa, 2019; Rivera & Ossa, 2017). Los resultados obtenidos por Ardila et al. (2015); Arenas (2017) y Rivera & Ossa (2017) establecen la viabilidad ambiental y aceptación social de las pacas biodigestoras debido a su uso potencial como laboratorio vivo o aula abierta para el aprendizaje de las ciencias

exactas y naturales, asimismo las experiencias desarrolladas han generado receptividad en las personas y promovido prácticas sostenibles que benefician los procesos ecológicos de la descomposición y comunitarios entorno a la autonomía y soberanía alimentaria.

Con relación a la aplicación de las pacas biodigestoras, Arenas (2017) recomienda su uso para aprovechar los residuos orgánicos generados y obtener abono rico en nutrientes, además que este constituye un proceso económico, de bajo impacto ambiental y alta eficiencia. En términos investigativos Arteaga & Castaño (2015) sugieren aplicar métodos más precisos para cuantificar la producción de gases del sistema. A la par, Ardila & Cano (2011) proponen utilizar otros tipos de residuos orgánicos en diferentes proporciones para evaluar la efectividad del método, describir el funcionamiento y analizar la calidad del producto final. Y Pulgarin (2018) considera necesario realizar estudios para conocer diferentes fenómenos como la cinética de degradación y producción de subproductos, así como la correlación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos durante el proceso de descomposición.

1.4 Conclusiones

Aun cuando se ha avanzado en el conocimiento del proceso de tratamiento de residuos orgánicos con pacas biodigestoras, su estudio o aplicación es incipiente y las investigaciones ejecutadas se encuentra en un repositorio institucional que limita el acceso a toda la comunidad científica, además hay una limitación por el idioma en el cual está publicado, lo cual limita su comprensión y posterior aplicación. Hasta ahora, los autores han enfocado sus investigaciones en analizar, desde la variación de los parámetros fisicoquímicos, cómo es el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en las pacas biodigestoras y evaluar la calidad del producto final, por medio de las características fisicoquímicas, microbiológicas, fitotóxicas y nutricionales. Adicional, han demostrado la utilidad del método para procesar los residuos orgánicos generados en contextos urbanos y rurales y realizar diferentes estrategias de aprovechamiento que posibilitan la protección de los recursos naturales, la mitigación de impactos negativos, el cuidado de la salud pública y la participación comunitaria, por medio de procesos de educación ambiental que fomentan las prácticas ambientales sostenibles. Sin duda, se han generado aportes con información que permite sumar evidencia para describir la dinámica de descomposición y el funcionamiento del sistema,

pero persiste desconocimiento sobre la temática para implementar las pacas biodigestoras como método de gestión. Por lo tanto, cualquier aplicación del método a pequeña, mediana o gran escala será por ahora un proceso de gestión experimental, pues se carece de procedimientos estandarizados que puedan predecir el funcionamiento cuando hay cambios en la densidad de la paca biodigestora, en el tipo de residuos orgánicos incorporados, en las condiciones ambientales del entorno o en otros aspectos que sin duda influyen directamente el proceso de descomposición.

1.5 Referencias

- Ardila Delgado, Jayme Liset, & Cano Córdoba, J. (2011). *Técnica de descomposición de residuos forestales y heces de establo con pacas digestoras : aspectos fisico-químicos , ambientales y sanitarios . Centro Educativo Conquistadores, Medellín.* Universidad de Antioquia.
- Ardila Delgado, Jeyme Liset, Cano Córdoba, J., Silva Pérez, G., & López Arango, Y. (2015a). Decomposition of organic waste in packs: physical, chemical, biological, environmental and sanitary aspects. *Producción + Limpia, 10(2)*, 38–52.
- Ardila Delgado, Jeyme Liset, Cano Córdoba, J., Silva Pérez, G., & López Arango, Y. (2015b). Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios. *Producción + Limpia, 10(2)*, 38–55. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1428/1/896-2554-1-PB.pdf>
- Arenas Osorno, C. Y. (2017). *Implementación de un sistema integral de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos en el Centro Educativo Rural Josefa Romero, Municipio de Dabeiba* (Universidad Pontificia Bolivariana). Retrieved from <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/3303>
- Arteaga Restrepo, C. D., & Castaño Velásquez, S. (2015a). *Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos, para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia,* (Universidad de Antioquia). Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1405084&rs=13253328&hitno=1>
- Arteaga Restrepo, C. D., & Castaño Velásquez, S. (2015b). *Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos , para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central , Universidad de Antioquia , Medellín, Colombia.* Universidad de Antioquia.
- Cardona Sánchez, J. D. (2018). *Caracterización fisicoquímica de las pacas biodigestoras en el proceso de tratamiento de la barra de café generada en la Universidad de Antioquia* (Universidad de Antioquia). Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1525438&rs=13252368&hitno=1>

- Castells, X. E., Ripoll, X. F., & Pozuelo, E. C. (2012). *Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=sAOTHkOK9CUC&pgis=1>
- Chaves, L. C., Ensslin, L., Ensslin, S. R., Petri, S. M., & Da Rosa, F. S. (2012). Gestão do processo decisório: mapeamento ao tema conforme as delimitações postas pelos pesquisadores. *Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios*, 5(3), 3. <https://doi.org/10.19177/reen.v5e320123-27>
- Dhanya, B. S., Mishra, A., Chandel, A. K., & Verma, M. L. (2020). Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Science of the Total Environment*, 723, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>
- Ensslin, S. R., Ensslin, L., Imlau, J. M., & Chaves, L. C. (2014). Processo de Mapeamento das Publicações Científicas de Um Tema: Portfólio Bibliográfico e Análise Bibliométrica sobre avaliação de desempenho de cooperativas de produção agropecuária. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 52(3), 587–608. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032014000300010>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (© World Ba). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Keng, Z. X., Chong, S., Ng, C. G., Ridzuan, N. I., Hanson, S., Pan, G. T., ... Lam, H. L. (2020). Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121220>
- López, G. (2003). Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo. *Tecnura*, 13(2), 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.074>
- Matos, L. dos S., Valmorbidia, S. M. I., Martins, V. A., & Ensslin, S. R. (2019). Development of Performance Evaluation Theme: a Systematic Analysis of the Literature. *Contextus – Revista Contemporânea de Economia e Gestão*, 17(2), 63–97. <https://doi.org/10.19094/contextus.v17i2.40146>
- Mauro Silveira, M., Vianna, W. B., & Ensslin, S. R. (2018). Innovation management in libraries: Fundamental elements of reviewing the international literature. *Investigacion Bibliotecologica*, 32(76), 29–44. <https://doi.org/10.22201/ibi.24488321xe.2018.76.57973>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1998). *Política para la Gestión Integral de Residuos*. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Políticas_de_la_Dirección/Política_para_la_gestión_integral_de__1.pdf
- Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa.
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Bogotá.

- Ochoa Arcia, A. D. (2019). *Desarrollo de alternativas para el manejo adecuado de residuos sólidos y orgánicos en el municipio de San Pedro de Urabá desde diversos espacios educativos*. Facultad de Ingeniería.
- 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*. Universidad de Antioquia.
- Paes, L. A. B., Bezerra, B. S., Deus, R. M., Jugend, D., & Battistelle, R. A. G. (2019). Organic solid waste management in a circular economy perspective – A systematic review and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118086>
- Pérez, G. S. *Manejo limpio y sano de residuos biodegradables en Pacas Digestoras Silva*. , (2012).
- Pérez, G. S. (2018). ¿Qué es la paca digestora silva? Un Reciclaje Orgánico Limpio y Saludable. *Revista TECSISTECATL*, 10(23). Retrieved from <https://www.eumed.net/rev/tecsistecat/n23/paca-digestora-silva.html>
- Posada Marín, Ana Maria. (2015). *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento San Antonio de Prado*. Universidad de Antioquia.
- Posada Marín, Ana María. (2015). *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimientos de San Antonio de Prado* (Universidad de Antioquia). Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1428422&rs=13253362&hitno=4>
- Pulgarin Muñoz, C. E. (2018). *Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia mediante pacas biodigestoras* (Universidad de Antioquia). Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&loid=1495501&rs=13253362&hitno=10>
- Pulgarin Muñoz, C. E., & Wills Betancur, B. A. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Producción + Limpia*, 14(1), 33–45. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/2659>
- Rivera Espinosa, R., & Ossa Carrasquilla, L. C. (2017). Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México. *Textual*, (69), 85–101. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.69.005>
- Rodrigues-Vaz, C., Oliveira-Inomata, D., & César-Stiirmer, J. (2014). Estado da arte do gerenciamento de resíduos sólidos em instituições de ensino superior: uma revisão de literatura. *Revista Cubana de Química*, 27(3), 228–242. Retrieved from <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/cq>
- Román, P., Martínez, M. M. &, & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*.

Experiencias en América Latina. Retrieved from www.fao.org/publications

- Silva Da Rosa, F., & Silva, L. C. (2017). Sustentabilidade ambiental nos hotéis, contribuição teórica e metodológica. *Revista Brasileira de Pesquisa Em Turismo*, 11(1), 39. <https://doi.org/10.7784/rbtur.v11i1.1161>
- Starovoytova, D. (2018). Solid Waste Management (SWM) at a University Campus (Part 1/10): Comprehensive-Review on Legal Framework and Background to Waste Management, at a Global Context. *Journal of Environment and Earth Science*, 8(4). Retrieved from www.iiste.org
- Velázquez Cigarroa, E., Ossa Carrasquilla, L. C., Jarquín Sanchez, N., & Victorino Ramírez, L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal*, 2(3). <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703108C>
- Wainaina, S., Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., ... Taherzadeh, M. J. (2020, April 1). Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*, Vol. 301, p. 122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>

2 Dinámica de las variables fisicoquímicas y microbiológicas durante la descomposición de residuos orgánicos en pacas biodigestoras

Resumen

En el presente artículo se exponen los resultados del análisis de las variables fisicoquímicas y microbiológicas durante el proceso de descomposición de residuos orgánicos en la PB y se determina la relación entre las variables y con los cambios en la concentración de la materia orgánica. Se ensamblaron 24 PB combinando en cada una 15 Kg de borra de café y 15 Kg de residuos de frutas, cubiertas por una capa de hojarasca y compactados en cubos con 50 cm de arista. Durante 120 días se monitorearon variables *in situ* y *ex situ*, los datos fueron recolectados cada 15 días mediante medición directa y la extracción de muestras separadas de tres PB seleccionadas aleatoriamente. Los resultados indicaron que la PB alcanzó a los 15 días una temperatura máxima promedio de $55.17 \pm 2.57^\circ\text{C}$, que coincide con el valor mínimo de pH registrado de 4.5 ± 0.50 . La relación C/N final fue de 15.75 ± 9.79 y presenta una correlación fuerte con el N total. Al inicio de la descomposición, los hongos lideran el proceso de transformación del material; entre los 15 y 45 días la concentración de heterótrofos es mayor que los demás grupos microbianos; posterior a los 75 días las células de *E. coli* no fueron detectables y al final, la cantidad de coliformes totales no supera los niveles máximos permitidos que puedan indicar contaminación bacteriológica del sustrato. Las fuertes correlaciones entre las variables monitoreadas durante el proceso de descomposición como, el contenido de cenizas con CIC (-0,6); pH con N total (0,48); la concentración de hongos con los heterótrofos (0,59) y coliformes totales (0,69); la cantidad de heterótrofos con la temperatura (0,71); la relación C/N con N total (-0,82), el porcentaje de germinación (-0,72), CRA (-0,79), pH (-0,48) y altura (0,61); están directamente relacionadas con la mineralización de la materia orgánica y por ende pueden aportar información importante sobre el proceso de estabilidad y madurez del sustrato en la PB.

Palabras clave: abono orgánico, descomposición, bioindicadores, paca biodigestora, transformación de residuos orgánicos.

2.1 Introducción

A nivel mundial, la gestión integral de los residuos sólidos municipales (GIRSM) presenta importantes desafíos sociales, ambientales y económicos, los cuales están directamente relacionados con la urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico (Guerrero et al., 2013; Onwosi et al., 2017). Actualmente, el mundo genera aproximadamente 2010 millones de toneladas de residuos sólidos municipales (RSM) al año, y al menos el 33 % de estos no se manejan de manera ambientalmente segura; cerca del 37 % de los RSM se elimina en algún tipo de relleno sanitario y de estos, solo el 8 % se elimina en rellenos sanitarios con sistemas de recolección de gases. La disposición en botaderos a cielo abierto representa aproximadamente el 32 % de los RSM, el 20 % se recupera mediante el reciclaje y el compostaje y el 11 % se incinera para su disposición final. Se espera que los RSM globales aumenten a 3 400 millones de toneladas para 2050, más del doble del crecimiento de la población durante el mismo período (Kaza et al., 2018).

Colombia, al igual que otros países, enfrenta grandes retos en la GIRSM. Según el informe nacional generado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), se producen anualmente cerca de 11 305 133 toneladas de RSM en todo el país, de ellos el 96,01 % se envían a los 174 rellenos sanitarios activos y con licencia en todo el territorio, el porcentaje restante es arrojado a botaderos a cielo abierto (1,98 %), enviados a celdas de contingencia (1,69 %), celdas transitorias (0,22 %) y plantas de tratamiento (0,10 %) (SSPD, 2019). Las fracciones orgánicas de los residuos sólidos urbanos se han convertido en un grave problema ambiental en Colombia; Andrade et al. (2018), informaron que de la cantidad total de residuos sólidos que se generan en el país, cerca del 59 % lo componen los orgánicos, de alimentos y jardín, la fracción restante está distribuida entre el papel (5 %), cartón (4 %), plástico (13 %), vidrio (2 %), metales (1 %) y otros (16 %).

El relleno sanitario La Pradera es el lugar de disposición final de los residuos sólidos generados por 32 municipios del departamento de Antioquia, en Colombia. Con base en la información presentada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL) y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) sobre la composición física porcentual de

residuos caracterizados en el relleno sanitario La Pradera, la mayor fracción dispuesta corresponde a los residuos orgánicos con un porcentaje promedio de 53,84 %, seguido de los reciclables con 21,15 %, ordinarios e inertes con 18,74 %, especiales y electrónicos con 4,51 % y en menor proporción los peligrosos con 1,78 % (ACODAL & AMVA, 2017).

Para evitar la disposición final de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios y aumentar las cifras de aprovechamiento, se deben adoptar estrategias de manejo efectivas. Entre los diferentes métodos para el tratamiento, la Paca Biodigestora (PB) ha logrado una gran aceptación social en Colombia debido a sus beneficios asociados, como la capacidad de procesar todo tipo de material biodegradable, la eliminación de malos olores y plagas, la rentabilidad en su aplicación, la diversidad de usos durante el proceso de descomposición como huertas ecológicas, jardineras, desarrollo paisajístico y cobertura con sucesión vegetal; además de la conversión de los residuos en abono, un subproducto con valor agregado (Ardila et al., 2015; Silva, 2018; Velázquez et al., 2017). Desde el punto de vista de Rivera y Ossa (2017), la PB es una alternativa viable para la gestión integral de los residuos orgánicos que puede ser aplicada tanto en sectores urbanos como rurales, además fomenta los procesos de participación comunitaria y educación ambiental.

Sin embargo, aunque se han desarrollado avances en la investigación del tratamiento de los residuos orgánicos en la PB y la evaluación de la calidad del abono orgánico resultante, los estudios son limitados. Algunas investigaciones han logrado aproximaciones representativas para comprender el mecanismo de transformación de los residuos orgánicos en las PB mediante el análisis de aspectos físicos, químicos, biológicos, ambientales y sanitarios (Ardila Delgado et al., 2015; Pulgarin y Wills, 2019); asimismo, Velázquez et al. (2017) informaron que el abono obtenido de la PB a los seis meses de descomposición de residuos orgánicos de alimentos y hojarasca, cumple con los estándares estipulados en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (2011), lo que permite considerar su viabilidad para usarse como enmienda del suelo, mejorar su calidad y disminuir el uso de fertilizantes inorgánicos, haciendo el proceso útil para la agricultura ecológica.

Teniendo en cuenta que los residuos orgánicos son una fuente importante de macro y micronutrientes como el carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, sodio, calcio, zinc, entre otros, es posible reconocer la importancia de reciclarlos y reincorporarlos a los suelos por medio

de estrategias de gestión integral como el tratamiento y aprovechamiento ecológico a través de la PB, donde primero se exponen los residuos orgánicos a procesos de conversión química para garantizar la disponibilidad biológica de los nutrientes y la eliminación de agentes patógenos, obteniendo un subproducto más seguro y estable (Kuryntseva et al., 2016; Soobhany, 2019). Y después, los residuos orgánicos transformados en abono pueden usarse como acondicionadores del suelo, lo cual mejora sus propiedades fisicoquímicas y biológicas (Peltre et al., 2015; Renaud et al., 2017). Sin embargo, la explicación de la dinámica del proceso de transformación de la materia orgánica hasta abono estable y maduro en la PB es incipiente, en gran parte porque se desconoce la influencia y variación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en dicho proceso.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como propósito realizar una primera aproximación al análisis de la dinámica de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca en PB, mediante la evaluación temporal de diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, durante el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en PB. A la par, generar un modelo que permita describir los cambios y características de la materia orgánica en el tiempo, con el cual sea posible aportar evidencia para caracterizar los mecanismos de descomposición, lograr mayores acercamientos conceptuales y científicos de la PB y fundamentar la toma de decisiones y el desarrollo de nuevas investigaciones.

2.2 Metodología

El montaje experimental se realizó en las instalaciones del Campus Principal de la Universidad de Antioquia (UdeA), Colombia, en donde también se recolectaron los residuos orgánicos utilizados como borra de café, residuos de frutas y hojarasca. De acuerdo con los resultados aportados por Cardona (2018), se utilizó una mezcla de borra de café con residuos de frutas de 30 Kg, en una proporción de 1:1, que se recubrió con hojarasca, para conseguir una relación C/N inicial cercana a 30 en el sistema.

La Figura 1 expone el procedimiento experimental realizado durante la investigación, el cual inició con la preparación de los residuos orgánicos para el montaje de 24 PB con 50 cm de arista,

siguiendo la metodología para el ensamblaje propuesta por Ossa (2016). Durante todo el proceso, las PB estuvieron a la intemperie y sobre el suelo.

Figura 1

Procedimiento experimental de la investigación en campo



Nota. Fuente elaborado por los autores.

Los residuos orgánicos fueron caracterizados antes de ser incorporados en las PB, para identificar los datos en el día cero. La medición de los parámetros se llevó a cabo durante 120 días, los datos fueron recolectados cada 15 días seleccionando aleatoriamente tres PB. La medición de las variables fisicoquímicas *in situ* se tomaron en el centro y a un medio de la altura registrada cada día en las PB. Para la temperatura, pH y temperatura ambiente se usó un medidor digital de suelo multiparamétrico con sonda de 20 cm (marca Yieryi, modelo TPH01803); la humedad se determinó con un medidor análogo con sonda metálica de 50 cm (marca Reotemp) y la altura con un flexómetro.

El análisis de las variables fisicoquímicas *ex situ* y microbiológicas se realizó a partir de la homogenización y cuarteo del material interno; de cada PB se extrajo dos muestras sólidas de 1 Kg de manera independiente. Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio del Grupo de Investigación de Estudios Moleculares (GIEM) y los microbiológicos en el Laboratorio Central de la Escuela de Microbiología de la Universidad de Antioquia. En la Tabla 1 se especifica la técnica y la norma de referencia para cada parámetro analizado. El contenido de materia orgánica (MO) se obtuvo con la información de las cenizas, utilizando el cálculo matemático propuesto por Defrieri et al. (2005): $MO \% = 100 - \% \text{ cenizas}$.

Tabla 1

Variable, técnica y norma de referencia de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en las muestras sólidas recolectadas durante la experimentación.

Parámetro	Técnica	Norma
Capacidad de retención de agua (CRA)	Gravimetría	NTC 5167
Conductividad	Potenciometría	NTC 5167
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Volumetría	NTC 5167
Porcentaje de germinación	Evaluación de la fracción hidrosoluble con el modelo biológico <i>Raphanus sativus</i>	Método interno
Respirometría (24 horas)	Titulométrica (producción CO ₂)	NTC 5167
Cenizas	Gravimetría	NTC 5167
Carbono Orgánico total	Titulométrica	NTC 5167
Nitrógeno total	Kjeldahl	NTC 370
Relación C/N	Cálculo matemático	NTC 5167
Calcio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Magnesio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Potasio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Sodio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Zinc total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Fósforo total	Espectrofotometría	NTC 234
Heterótrofos	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
Hongos	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
Coliformes totales	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
<i>E. coli</i>	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167

El análisis estadístico de los datos se realizó usando el paquete IBM SPSS Statistics V25.0. Se aplicó un modelo de efectos fijos, donde se consideró el tiempo como factor y se trató como una variable categórica. Inicialmente, se realizó un análisis exploratorio de los datos para determinar si las variables son o no paramétricas, por medio de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, Kolmogorov-Smirnov normal y ajustada; la homocedasticidad con la prueba de Levene’s y la independencia con la prueba de bondad de ajuste R². Luego, en las variables paramétricas, se utilizó el análisis de varianza unifactorial (ANOVA) para determinar cambios con respecto al tiempo de

descomposición y medir su efecto; en las no paramétricas se empleó el procedimiento H de Kruskal-Wallis. Los contrastes Post hoc fueron realizados a través del método de Tukey para el caso paramétrico y mediante la prueba U de Mann-Whitney con corrección de Bonferroni para el no paramétrico.

Se complementó el manejo estadístico de los datos, mediante un análisis de componentes principales (PCA) con base en la matriz de correlaciones entre las variables que se consideraron relevantes, por los resultados de investigaciones previas. El PCA se repitió de forma individual para cada componente con el fin de obtener los valores de cada uno a través de sus respectivas puntuaciones tipificadas que, una vez halladas, generó un modelo de regresión lineal múltiple en el que la variable dependiente (VD) fue la materia orgánica y las independientes (VI) fueron dichos componentes. Al final, el modelo matemático queda definido de la siguiente forma: $MO = \beta_1 C_1 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3 + \dots + \beta_i C_i + \beta_0$; donde los C_i son los componentes ya mencionados y los β_i son los coeficientes que expresan la razón de cambio en MO por cada cambio unitario en los C_i , asumiendo que el resto de los elementos permanecen constantes. El término β_0 corresponde al corte con el hiperplano generado por las VI, el cual no tiene interpretación práctica en este contexto.

Una vez consolidado el modelo, se realizaron los diagnósticos respectivos y se verificó el cumplimiento del supuesto de multicolinealidad mediante el factor de inflación de la varianza (FIV) y el índice de condición (IC). Los puntos de corte para estos indicadores sugieren valores cercanos a 1 para el primero, y no mayores que 30 para el segundo. Acto seguido, se procedió a validar la normalidad de los residuales a través del contraste de Shapiro-Wilk, los histogramas, diagramas de caja y gráficos Q-Q. Posteriormente, se examinó la homocedasticidad residual por medio de gráficos de dispersión y se evaluó la posible autocorrelación residual empleando el estadístico de Durbin-Watson. Finalmente, se revisaron los puntos atípicos y puntos de influencia para tomar decisiones, ya que estos pueden ser valores que cambian la relación de los datos y la significancia de los componentes en el modelo de regresión; para ello, se usaron los residuales tipificados, además de distancias como las de Mahalanobis, DFBETAS y de Cook.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Dinámica de los parámetros fisicoquímicos in situ

Las mediciones de temperatura y pH en el centro de la PB, así como la temperatura ambiente registrada durante los 120 días del experimento se pueden observar en la figura 2. En el periodo de experimentación, la temperatura ambiente promedio fue de $26,12\text{ }^{\circ}\text{C}$. El comportamiento de la temperatura en el centro de la PB durante el tiempo de monitoreo se podría clasificar en cuatro etapas o fases de descomposición: mesofílica ($20\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$), termofílica ($40\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$), enfriamiento y maduración ($50\text{-}20\text{ }^{\circ}\text{C}$). La fase mesofílica duró pocos días, la temperatura aumenta rápidamente desde $32,53 \pm 2,30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dando paso a la fase termofílica, en donde se registró al día 15 de monitoreo la temperatura máxima promedio de la PB ($55,17 \pm 2,57\text{ }^{\circ}\text{C}$), la cual coincidió con el valor mínimo de pH registrado ($4,5 \pm 0,50$). De acuerdo con Oviedo-Ocaña et al. (2019) la disminución del pH puede deberse principalmente a los ácidos orgánicos liberados de los carbohidratos y lípidos degradados por los microorganismos, que con su actividad de descomposición y reproducción generan también un aumento en la temperatura. El día 30 se identificó una temperatura promedio de $44,73 \pm 6,03\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se podría considerar el inicio de la fase de enfriamiento, en la cual la materia orgánica tiende a estabilizarse, con ello la temperatura promedio de la PB comienza a descender paulatinamente hasta valores cercanos a la temperatura ambiente y el pH aumenta hasta acercarse a los rangos de neutralidad, siendo esto característico de los procesos de estabilización de la materia orgánica durante mecanismos de descomposición biológica (Cerde et al., 2018; Khatua et al., 2018; Onwosi et al., 2017).

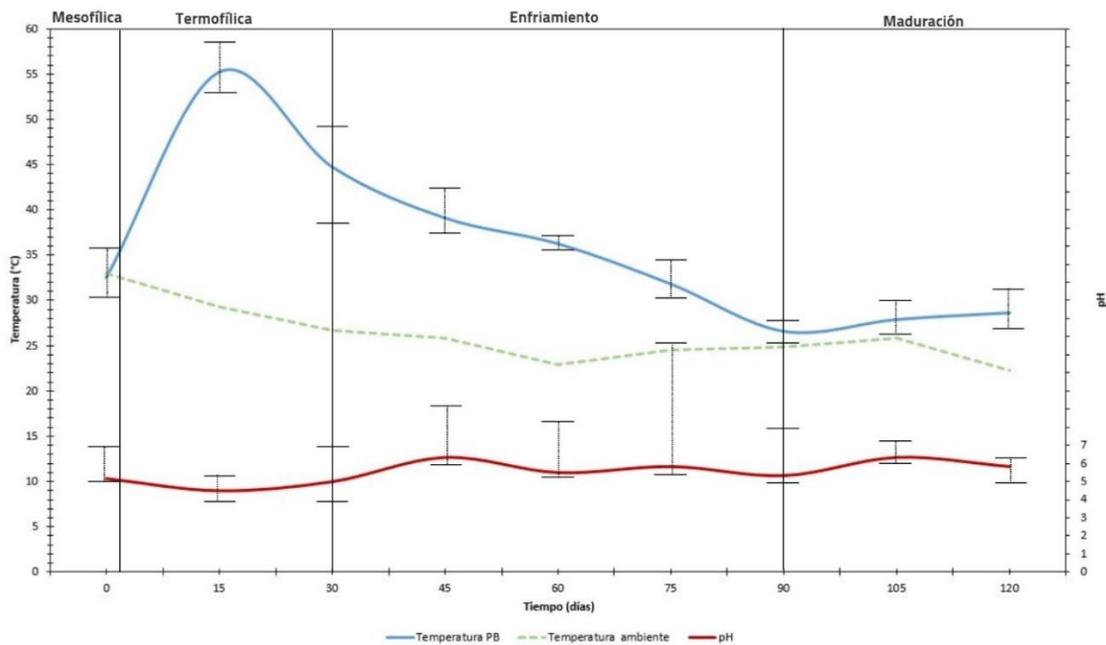
Posterior a los 90 días, los cambios en la temperatura de la PB oscilaron con valores muy cercanos a la temperatura ambiente de la zona, entre los $27,93 \pm 2,38$ y $28,67 \pm 4,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el pH varió entre el rango de la neutralidad con valores de $6,33 \pm 0,29$ y $5,83 \pm 0,29$, lo cual permite considerar el inicio de la etapa de maduración en la PB. En esta etapa, la liberación de calor y la pérdida de peso del material son bajas, lo cual generalmente se debe a que el proceso se realiza a temperatura ambiente y los valores de pH aumentan hasta permanecer en el rango de la neutralidad como indicador de estabilidad (Cerde et al., 2018). El aumento del pH puede deberse a la liberación de amoníaco que alcaliniza el medio cuando los microorganismos degradan las proteínas (Azim et al.,

2018). Fourti (2013) informó que la disminución de la temperatura durante la fase de enfriamiento y maduración podría ser resultado del agotamiento del sustrato disponible y la sustitución de la microbiota termófila por una mesófila, que se encargan fundamentalmente de la degradación parcial de compuestos biorresistentes como la celulosa y la lignina. Por su parte, El Fels et al. (2014) afirmaron que durante la maduración se pueden producir reacciones secundarias de polimerización y condensación que conducen a la formación de humus con ácidos húmicos, los cuales son particularmente resistentes a la degradación.

El tiempo presenta un efecto significativo sobre las variaciones de la temperatura ($p=2,5 \times 10^{-8}$) y el pH promedio ($p=0,016$) registrados en el centro de la PB durante el proceso de descomposición. Así, durante las primeras tres fases se espera que se produzca la ruptura de la materia orgánica simple y compleja, se genere la descomposición de la mayor parte del material biodegradable y la estabilidad de los residuos orgánicos incorporados debido a la acción de los microorganismos presentes. Al final, en la fase de maduración, se esperaría la reorganización de la materia orgánica en moléculas más estables, es decir, se convierte una parte del material orgánico remanente en sustancias húmicas (Azim et al., 2018; Martínez et al., 2019; Oviedo-Ocaña et al., 2015).

Figura 2

Variación de la temperatura (línea azul) y el pH (línea roja) en el centro de la PB y los cambios de la temperatura ambiente (línea verde punteada) durante el experimento de descomposición de los residuos orgánicos en la PB.



Nota. Las barras de error representan \pm la desviación estándar para $n=3$. Fuente: Elaborado por los autores.

En la Figura 3 se muestran los cambios de la humedad registrada en el centro de la PB durante el proceso de descomposición. La variable no tiene una distribución normal ($p=0,667$) y de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes, la distribución de la humedad no varía significativamente durante el tiempo de descomposición ($p=0,136$). La humedad promedio registrada en el centro de la PB fue de $83,33 \pm 3,81$ % y las medianas de los registros de humedad durante el tiempo de descomposición estuvieron por encima del 50 %, lo cual garantiza las condiciones apropiadas para la actividad microbiana, así como la estructura física y, por lo tanto, tienen una influencia central en la biodegradación de los materiales orgánicos ya que valores bajos de humedad (< 50 %) ocasionan la deshidratación del material, lo que detendría el proceso biológico dando sistemas físicamente estables pero biológicamente inestables (Makan et al., 2013). Por otro lado, en la Figura 4 se observan los cambios en la altura de la PB en el tiempo, esta variable es probablemente un indicador de la descomposición de los residuos orgánicos en el sistema, ya que el factor tiempo presenta un efecto significativo ($p=0,000009$) sobre las variaciones de la altura promedio de la PB; además, a mayor tiempo de descomposición menor es la altura de la PB. En el estudio, la altura inicial de la PB fue de 50 cm, la final significativamente diferente y cerca de la mitad de la inicial, $26,43 \pm 1,50$ cm.

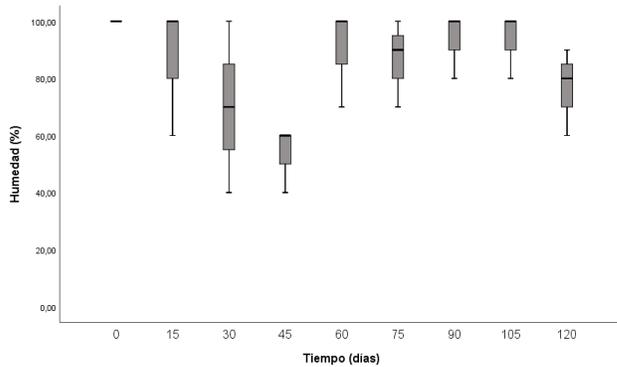


Figura 3. Variación de la humedad durante el proceso de descomposición de residuos orgánicos en la PB.
Nota. Fuente elaborado por los autores.

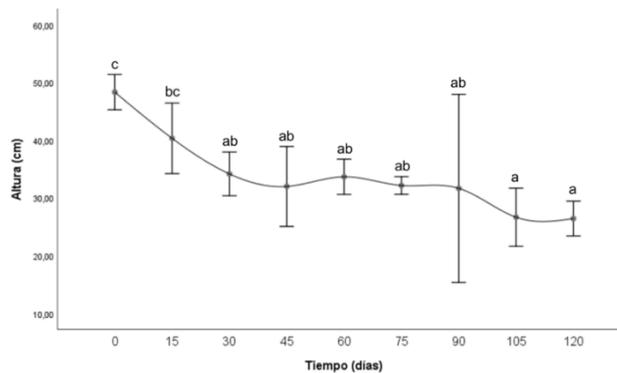


Figura 4. Variación de la altura durante el proceso de descomposición de residuos orgánicos en la PB (las barras de error representan \pm la desviación estándar para $n=3$). Valores con letras distintas indican que las medias son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).
Nota. Fuente elaborado por los autores.

2.3.2 Dinámica de los parámetros fisicoquímicos *ex situ*

Las propiedades fisicoquímicas iniciales y durante 120 días de descomposición de los residuos de frutas, borra de café y hojarasca procesados en PB se muestran en la Tabla 2. De acuerdo con los análisis estadísticos, las propiedades fisicoquímicas reportadas a continuación coinciden en que el tiempo ejerce un efecto significativo en la variación durante el proceso de descomposición para valores $p < 0,05$. Sin embargo, podría considerarse que el tiempo no es la única variable que ejerce el efecto sobre los cambios en la PB, sino también la interacción entre los procesos físicos y microbiológicos.

Tabla 2.

Variables paramétricas analizadas en las PB durante 120 días de descomposición de los residuos orgánicos estudiados.

Tiempo (días)	CRA (%)	CE (dS/m)	CIC (meq/100 g)	Ger (%)	Res (mg CO ₂ /g)	Cenizas (%)	C/N	COT (%)	N _{total} (%)
0	73±0,00a	0,87±0,00ab	34,2±0,00a	0,0±0,0a	2,48±0,0ab	51±0,0b	37,5±0,0c	43,8±0,0a	1,17±0,0a
15	145,67±9,07bcd	1,16±0,08b	59,73±0,83ab	86,67±15,28b	2,14±0,59ab	16,63±5,01a	16,96±7,40ab	32,83±1,63a	2,32±1,32ab

Tiempo (días)	CRA (%)	CE (dS/m)	CIC (meq/100 g)	Ger (%)	Res (mg CO ₂ /g)	Cenizas (%)	C/N	COT (%)	N_total (%)
30	103±7,81ab	0,95±0,05ab	62,37±7,72b	73,33±2,89b	3,99±0,42b	17,19±13,75ab	25,47±4,26bc	42,37±6,77a	1,69±0,37ab
45	190,67±14,29de	0,79±0,02a	53,9±3,93ab	66,67±7,64b	1,84±0,19a	20,17±4,48ab	12,8±2,41ab	38,07±2,53a	3,01±0,37ab
60	178,67±20,03cde	0,82±0,31ab	75,23±5,10b	93,33±7,64b	2,52±0,82ab	11,10±7,70a	8,57±2,03a	40,6±5,17a	4,84±0,72b
75	191±27,50de	0,88±0,10ab	50,13±10,96ab	90±5,00b	1,77±0,70a	16,47±6,69a	9,73±2,55a	38,03±2,98a	4,07±0,84ab
90	162,33±19,22cde	0,74±0,07a	65,87±12,86b	93,33±5,77b	1,36±0,21a	32,73±22,66ab	11,51±5,09ab	45,6±3,48a	4,41±1,61b
105	200,33±15,18e	1,03±0,11ab	57,37±ab	65±30,41b	2,02±0,85ab	20,16±13,16ab	8,71±2,18a	35,33±13,81a	4,25±2,16ab
120	145±13,21bc	1,08±0,09ab	53,33±11,37ab	86,67±2,89b	2,11±1,46ab	25,28±16,28ab	15,75±9,79ab	33,67±7,19a	2,49±0,86ab

Nota. Los valores son las medias \pm desviación estándar ($n = 3$). Los valores de la variable dentro de la misma columna seguidos de la misma letra indican que las medias no son significativamente diferentes en el tiempo según la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Capacidad de retención de agua (CRA), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de germinación (Ger), respirometría (Res), relación C/N (C/N), carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total (N_total).

En el caso de la CRA se registró un aumento progresivo desde el inicio del proceso, sugiriendo una mayor disponibilidad de agua en el sistema con relación a su masa seca (Arango-Osorno et al., 2016). Todos los valores son relativamente altos en comparación con el porcentaje registrado en la mezcla inicial ($73 \pm 0,00 \%$), que corresponde al valor mínimo. La CRA entre los 45 y 90 días presentó valores homogéneos y significativamente similares; el valor máximo se obtuvo a los 105 días de descomposición con $200,33 \pm 15,18 \%$, lo que significa que el sustrato puede absorber aproximadamente dos veces su masa seca durante la fase de maduración.

La CE como medida indirecta de la cantidad de sales en el sustrato mostró un valor inicial de $0,87 \pm 0,00$ dS/m que aumentó significativamente durante la fase termofílica hasta un valor máximo de $1,16 \pm 0,08$ dS/m registrado a los 15 días, el cual fue disminuyendo progresivamente en la fase de enfriamiento hasta los 90 días, donde se registró un valor de $0,74 \pm 0,07$ dS/m. Onwosi et al., (2017) informaron que la disminución de la CE o la falta de cambios significativos durante los procesos de descomposición a pesar de la mineralización de los compuestos orgánicos puede deberse a la pérdida de las sales solubles por medio de la lixiviación.

La CIC define la capacidad de retener los elementos necesarios para nutrir las plantas y se utiliza como un indicador de madurez del sustrato (Albarracín et al., 2018). Tal como se observa en la Tabla 2, durante el proceso de descomposición se presentaron diferencias significativas entre el valor mínimo de $34,20 \pm 0,00$ meq/100 g en el día cero y el valor máximo de $75,23 \pm 5,10$ meq/100

g registrado a los 60 días de descomposición. Este último, no muestra cambios significativos con los valores reportados en los días 30 y 90. Los aumentos en la CIC indican que la fracción orgánica de los residuos se va humificando durante el proceso de descomposición (Onwosi et al., 2017). Sin embargo, la CIC registrada a los 15, 45, 75, 105 y 120 mostró que las medias no son significativamente diferentes. Esto se puede deber a que el proceso de descomposición y humificación de los residuos orgánicos en la PB presenta cambios lentos pero constantes.

Según el estudio realizado por Cerda et al. (2018), el porcentaje de germinación representa un indicador que describe el estado de madurez y fitotoxicidad de los sustratos, sin embargo, se considera necesario incluir otros parámetros ya que la madurez o estabilidad no se describe por una sola propiedad. En el presente estudio, el porcentaje de germinación de las semillas de *Raphanus sativus* a partir del día 15 de descomposición no registró cambios significativos en el tiempo y todas las muestras tuvieron un valor superior al 50 %, que según Luo et al. (2018), indica un sustrato libre de compuestos fitotóxicos y su aplicación no afecta el crecimiento de las plantas ni la calidad del suelo.

La respirometría está directamente relacionada con la actividad enzimática y el contenido de ácidos húmicos, por lo que se requieren índices respirométricos para el control de los procesos biológicos debido a que estos dan cuenta de la actividad microbiana y por ende información sobre la estabilidad y madurez del sustrato (Saldarriaga, Gallego, López, Aguado, & Olazar, 2019). En la presente investigación, la respirometría alcanza su punto máximo en el día 30 de descomposición (3.99 ± 0.42 mg CO₂/g), 15 días después de registrarse en la PB la temperatura máxima, la alta tasa de producción de CO₂ puede deberse al creciente desarrollo de los microorganismos como consecuencia de la degradación de los compuestos fácilmente biodegradables de las materias primas (Cerda et al., 2018). La disminución de la respirometría se da progresivamente a partir del día 30, pero en la etapa de maduración, aunque los cambios no son significativamente diferentes, se presenta un aumento a partir del día 90, hasta un valor de 2.11 ± 1.46 mg CO₂/g registrado a los 120 días, lo cual podría estar relacionado con una proliferación de microorganismos mesófilos que ayudan con la estabilización final del material orgánico (Gómez et al., 2006).

Según la NTC 5167 (2011), el contenido máximo de cenizas al final de la descomposición debe ser del 60 %. El porcentaje de cenizas de la muestra inicial fue del 51 %, un valor atípico y significativamente diferente a los registrados durante el proceso de descomposición. Sin embargo, los cambios presentados a partir del día 15 hasta el final del monitoreo, muestran un aumento progresivo desde $16,63 \pm 5,01$ % hasta $25,28 \pm 16,28$ %, respectivamente. Dicho aumento estaría relacionado directamente con el proceso de mineralización de los compuestos que reflejan el agotamiento de la materia orgánica con el tiempo y a su vez aportan una cantidad de material inorgánico en el sustrato (Terán et al., 2018).

La relación C/N se utiliza como indicador de la madurez del sustrato (Raj & Antil, 2011). Al inicio del proceso de descomposición, se encontró el valor máximo de la relación C/N en la PB ($37,5 \pm 0,0$), lo que puede significar que el tiempo de descomposición sea más largo, ya que si la relación C/N inicial es superior a 35, los microorganismos deben pasar por muchos ciclos de vida para oxidar el exceso de carbono y la tasa de fermentación estará controlada por la disponibilidad de nitrógeno (Azim et al., 2018). Aun cuando la relación C/N inicial fue alta, se observó una rápida disminución, alcanzando a los 15 días un nivel de $16,96 \pm 7,40$; el cual no muestra diferencias significativas con los valores reportados a los 45, 90 y 120 días, que representan el periodo de enfriamiento y el final de la fase de maduración. Esto puede deberse a que a medida que avanzó la descomposición se presentaron pequeñas pérdidas de carbono y el contenido de nitrógeno por unidad de material aumentó. Sin embargo, la muestra final del sustrato registró una relación C/N de $15,75 \pm 9,79$, referenciando un cambio significativo en comparación con el valor inicial; y de acuerdo a lo sugerido por Escobar et al. (2012), se encuentra dentro del rango de referencia de 10 a 20 que denota un material de buena calidad y apropiado para su uso.

La concentración de COT en la PB disminuyó a través del tiempo, a pesar de que los cambios registrados no fueron significativamente diferentes durante el proceso. El COT obtenido en la mezcla inicial (día cero) fue de $43,8 \pm 0,0$ % y los valores mínimos de $32,83 \pm 1,63$ y $33,67 \pm 7,19$ % se presentaron a los 15 y 120 días de la descomposición, que coinciden respectivamente con el día donde se obtuvo el máximo de temperatura y mínimo de pH promedio en el centro de la PB y con el final del proceso de descomposición. De acuerdo con Acosta et al. (2012), la disminución en la concentración de COT puede atribuirse a la degradación de la materia orgánica, donde en la

fase termofílica (15 días) los microorganismos actúan sobre las fracciones de carbono más fácilmente biodegradables (azúcares, lípidos, ácidos orgánicos, entre otras) que a su vez estimulan la respiración y el crecimiento de otros microorganismos. Asimismo, la liberación de CO₂ durante el proceso de fermentación influye en el descenso en la concentración de COT.

Al inicio (día cero), la concentración de nitrógeno total promedio de la PB registró el porcentaje mínimo del $1,17 \pm 0,0$ %. Luego, los valores aumentaron con el tiempo hasta los 60 días de descomposición, donde el porcentaje registrado fue el máximo ($4,84 \pm 0,72$ %), esto podría ser el resultado de la inmovilización del nitrógeno, el cual sucede cuando el nitrógeno inorgánico liberado, es transformado nuevamente en formas orgánicas al ser asimilado por los microorganismos, incluyendo además los aportes de este elemento por parte de la borra de café (Pandey et al., 2016). Posterior a los 60 días, la concentración de nitrógeno total promedio descendió, alcanzando al final del monitoreo un valor de $2,49 \pm 0,86$ %, que representa una alta concentración con relación a lo mínimo requerido, logrando así influenciar la disminución de la relación C/N en el sustrato.

Al analizar los nutrientes, la variación de las concentraciones de (a) CaO (b) MgO, K₂O, P₂O₅ (c) Na y Zn en la PB durante el proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca se observa en la Figura 5. En el análisis de varianza, utilizando pruebas paramétricas, se encontró que el tiempo no tiene un efecto significativo en los cambios de las concentraciones de MgO ($p=0,49$), K₂O ($p=0,704$) y P₂O₅ ($p=0,25$) durante el proceso de descomposición y según la prueba de Tukey, tampoco se presentan cambios significativos durante el tiempo de monitoreo. La prueba de Kruskal-Wallis efectuada para variables no paramétricas, indicó que las concentraciones de CaO ($p=0,253$) y Na ($p=0,107$) es aproximadamente la misma entre las categorías de tiempo. Y, en el caso del Zn, se presentaron diferencias significativas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p=0,009$) y al menos en uno de los tiempos se generó un cambio importante.

El contenido de CaO es superior en todos los tiempos a la concentración de los otros elementos, seguido del K₂O y P₂O₅. El CaO fue mayor al inicio de la descomposición (día cero) con $4,49 \pm 0,0$, el porcentaje mínimo se presentó a los 60 días, en la fase de enfriamiento, con $1,02 \pm 0,44$ % y en la fase de maduración, a los 120 días, la concentración fue del $2,11 \pm 5,56$ %. El CaO es uno

de los micronutrientes principales en el abono orgánico; su presencia se debe especialmente a los residuos de alimentos y es fundamental para contrarrestar los efectos de las sales alcalinas y los ácidos orgánicos (Montejo et al., 2015).

El K_2O es un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Arango-Osorno et al., 2016). Este metal alcalino, expresado como K_2O muestran inicialmente una concentración de $0,81 \pm 0,0$ % que aumenta en una menor cantidad a un valor de $0,92 \pm 0,75$ % al final del proceso. Por su parte, el P_2O_5 es un macronutriente que siempre tiene una concentración menor a la del carbono y su importancia se debe a que está presente en las moléculas orgánicas de muchas rutas metabólicas aerobias y anaerobias (Arango-Osorno et al., 2016). En la PB, el P_2O_5 presentó oscilaciones a lo largo del tiempo; inicialmente, la concentración aumento de $0,29 \pm 0,0$ % hasta $0,73 \pm 0,17$ %, correspondiente a los valores mínimo y máximo presentados a los 0 y 30 días, respectivamente. Al final del monitoreo, se registró un ascenso que continuó hasta el día 105 con un valor del $0,66 \pm 0,11$ %, y en el día 120 el porcentaje descendió ligeramente hasta $0,47 \pm 0,59$ %. Algunas perdidas del K_2O y P_2O_5 durante la descomposición podrían deberse a la fuga de estos elementos por lixiviación y las bajas cantidades también pueden estar relacionadas con las diferentes características fisicoquímicas de los sustratos originales (Soobhany, 2019). Además, dado que estos elementos no son sustancias volátiles y permanecen en el producto final, cualquier aumento en su concentración refleja pérdidas netas de masa inducidas por la descomposición, ya que el carbono y las sustancias volátiles se pierden durante la transformación de la materia orgánica (Liu & Price, 2011).

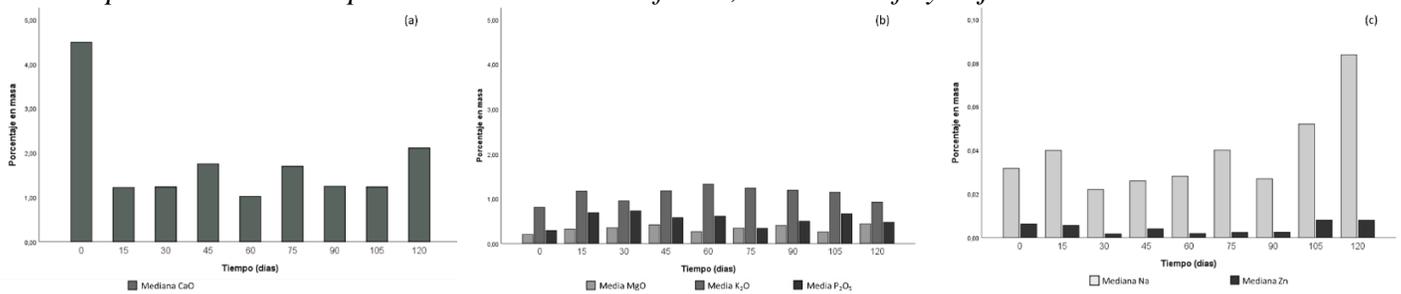
El MgO y el Zn forman parte de los metales de interés en los proceso de intercambio iónico y conductividad eléctrica (Arango-Osorno et al., 2016). En la experimentación se observó que el MgO y el Zn presentaron las menores concentraciones a lo largo del tiempo con relación a los demás elementos. El porcentaje mínimo del Mg ($0,20 \pm 0,0$) y máximo ($0,44 \pm 0,35$) se presentó al inicio (día cero) y al final (día 120) del proceso de descomposición, respectivamente. De acuerdo con lo citado por Soobhany (2019), la dinámica del MgO en el tiempo está relacionado con el proceso de mineralización, la pérdida de masa y de materia orgánica en la descomposición. En el caso del Zn , al inicio se encontró un valor de $0,006 \pm 0,0$ % que disminuyó progresivamente hasta el día 60, donde se registró el porcentaje mínimo de $0,002 \pm 0,0$ %. Al final, en el día 120 se reportó

un valor de $0,014 \pm 0,013$ %. Montejo et al. (2015) afirmaron que el Zn es un elemento esencial para las plantas y tiene un bajo potencial de causar fitotoxicidad, por lo que el uso de abonos que contengan este elemento así sea en pequeñas concentraciones puede ser beneficioso en suelos o cultivos que presenten déficit.

En el caso del Na, al inicio del proceso presentó una concentración de $0,03 \pm 0,0$ %, la cual no cambio significativamente ($p=0,107$) hasta del día 75, donde registró un pequeño aumento hasta $0,06 \pm 0,06$ %. Al final del monitoreo en los días 105 y 120, la concentración se multiplicó casi por 10, registrando valores de $0,12 \pm 0,12$ y $0,11 \pm 0,11$ %, respectivamente. Las pérdidas de Na durante el proceso puede ser causa de la lixiviación y por el contrario, el aumento en el contenido de Na podría estar relacionado con la disponibilidad del micronutriente en la mezcla inicial (Soobhany, 2019).

Figura 5.

Variación de las concentraciones de (a) CaO (b) MgO, K₂O, P₂O₅ (c) Na y Zn en la PB durante el proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca.



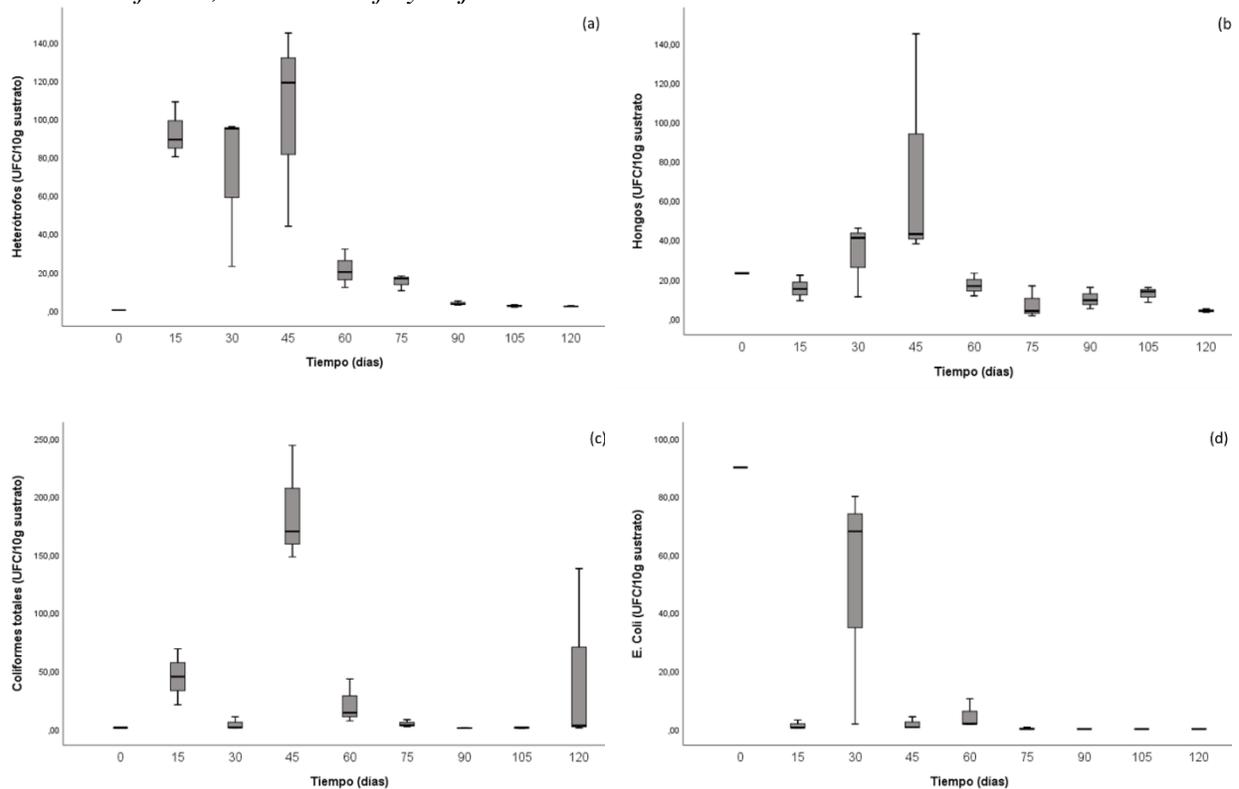
2.3.3 Dinámica de los parámetros microbiológicos

Durante el proceso de descomposición, los microorganismos transforman la materia orgánica degradable en un producto similar al humus (Sarkar et al., 2010). A razón de que los grupos microbianos son esenciales para describir la dinámica de descomposición en la PB, se evaluó la variación de la concentración de los heterótrofos, hongos, coliformes totales y *E. coli* en el tiempo tomado como factor fijo (Figura 6).

En el análisis estadístico se encontró que ninguna variable microbiológica se ajustó a una distribución normal; por lo tanto, mediante la prueba de Kruskal-Wallis fue posible determinar que el tiempo tiene un efecto significativo sobre los cambios en la concentración de los heterótrofos ($p=0,002$), hongos ($p=0,019$), coliformes totales ($p=0,013$) y *E. coli* ($p=0,003$) presentes en la PB. En este sentido, la distribución de cada una de las variables presenta diferencias significativas en al menos uno de los tiempos de observación.

Figura 6.

Variación de las concentraciones de los grupos microbianos (a) Heterótrofos, (b) Hongos, (c) Coliformes totales y (d) *E. coli* evaluados en la PB durante el proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca



Nota. Para facilitar la lectura en los gráficos y eliminar la notación científica, las variables fueron recodificadas multiplicando las cantidades así: Heterótrofos ($\times 10^8$), Hongos ($\times 10^6$), Coliformes totales ($\times 10^6$) y *E. coli* ($\times 10^4$).

Se observa que el recuento total de heterótrofos alcanzó su punto mínimo en el día cero con un valor de $0,10 \pm 0,0$ UFC/10 g de sustrato, el cual corresponde al análisis de la muestra inicial de los residuos orgánicos que se incorporaron en la PB. Entre el día 15 y 45 se registraron las mayores concentraciones de heterótrofos en el proceso de descomposición, con un valor máximo de

102,67 ± 52,44 UFC/10 g presentado al inicio de la que fue considerada la fase de enfriamiento. Este aumento puede deberse a la disponibilidad de sustrato biológicamente asimilable, el cual favorece el incremento de estos. Sin embargo, a partir del día 60, la concentración de heterótrofos disminuye significativamente hasta alcanzar un valor de 2,13 ± 0,24 UFC/10 g en el día 120. La disminución en la concentración de heterótrofos se debe principalmente a que este grupo microbiano usa como fuente de carbono los compuestos orgánicos, constituidos por moléculas simples y fácilmente biodegradables, que les permite generar nuevas estructuras como biomasa. Cuando el proceso de descomposición avanza, la fuente de energía para los microorganismos es limitada y la actividad microbiana se ralentiza indicando la estabilización de la materia orgánica o por el contrario, un remanente de materiales mucho más difíciles de degradar (Benito, Masaguer, Moliner, Arrigo, & Palma, 2003). Esta última situación, puede ser considerada la más plausible en la investigación debido a que al final del proceso se evidencia una cantidad importante de materia orgánica.

El conteo de hongos incluyó la suma de los mohos y levaduras. La Figura 6 (b) muestra la variación de este grupo microbiano durante los 120 días de monitoreo. A diferencia de los heterótrofos, al inicio de la descomposición (día 0), la concentración de estos era alta con un valor promedio de 23,00 ± 0,0 UFC/10 g, la cual disminuyó gradualmente durante el resto de la fase termófila, específicamente en el día 15, que coincide con el máximo de temperatura en la PB. No obstante, en esta fase podrían participar algunos hongos termófilos y tolerantes al calor lo que probablemente hace que el pH disminuya, especialmente cuando los microorganismos degradan los compuestos más lábiles y se produce una liberación de ácidos orgánicos (Azim et al., 2018). A partir del día 30, donde se marcó el inicio de la fase de enfriamiento, los organismos mesófilos comienzan a restablecer su concentración y aportan en la estabilización del material remanente. En el día 45, los hongos logran un aumento significativo y se reporta la concentración máxima de 75,33 ± 60,38 UFC/10 g. Posteriormente, se da una disminución paulatina en la concentración de hongos que se extiende hasta la fase de maduración, con un valor de 3,95 ± 0,80 UFC/10 g, en este periodo el proceso se realiza en condiciones muy cercanas a la temperatura ambiente, con variaciones del pH en el rango de la neutralidad y porcentajes óptimos de humedad, lo cual favorece la reproducción de microorganismos mesófilos.

Las coliformes totales comparten ciertas características fisiológicas, a la par que pueden comportarse como patógenos oportunistas de humanos (Jara et al., 2016). De acuerdo con lo informado por Román et al. (2013), la presencia de altas temperaturas ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante el proceso de descomposición permite la higienización del material, ya que algunos microorganismos termofílicos y patógenos no resisten esta condición. Sin embargo, también establecen que con recuentos por debajo de 1000 UFC/g en peso seco del sustrato, podría significar que los patógenos entéricos han sido destruidos y los remanentes hacen parte del conjunto de microorganismos que aportan en el proceso de descomposición. Según lo evidenciado en la presente investigación y tal como se muestra en la Figura 6 (c), los cambios en la concentración de los coliformes totales no fueron significativos en la fases mesofílica y termofílica, aun cuando se registró un aumento desde $1,10 \pm 0,0$ UFC/ 10 g en el día cero hasta $44,97 \pm 24,05$ UFC/ 10 g en el día 15, representando una cantidad microbiana que se encuentra asociada a la mezcla inicial y su reproducción se ve favorecida hasta que el sistema registra la temperatura máxima, ya que posterior a los 15 días se observa una disminución hasta $4,26 \pm 5,32$ UFC/ 10 g en el día 30. A los 45 días, se presentó un cambio significativo en la concentración de coliformes totales, obteniendo el máximo de concentración de este grupo microbiano, con una cantidad de $187,33 \pm 50,29$ UFC/ 10 g. Durante la fase de enfriamiento y maduración, los coliformes totales disminuyen hasta la concentración mínima de $0,83 \pm 0,39$ UFC/ 10 g registrado a los 90 días. A pesar de que la concentración aumenta al final del proceso, con un valor de $47,28 \pm 78,57$ UFC/ 10 g a los 120 días de descomposición, la cantidad identificada no supera los niveles máximos permitidos que puedan indicar contaminación microbiológica del sustrato por la presencia de coliformes.

Cabe resaltar que dentro del grupo coliforme está incluido el género *E. coli*, pero en la investigación se analizaron de manera separada, ya que este representa un grupo de bacterias patógenas que pueden condicionar la calidad y usos del sustrato (Pandey et al., 2016). En la Figura 6 (d) se observa que la concentración de *E. coli* en la muestra inicial (día 0) fue de $90,0 \pm 0,0$ UFC/ 10 g, luego se presentó un cambio significativo con respecto al valor identificado a los 15 días, el cual mostró una disminución hasta $1,33 \pm 1,50$ UFC/ 10 g. Esta disminución probablemente está relacionada con el aumento en la temperatura hasta su punto máximo y la disminución del pH hasta el punto mínimo en el sistema, a razón de que *E. coli* es principalmente un microorganismo mesófilo, su reproducción y crecimiento se ve directamente afectado por las altas temperaturas y los niveles

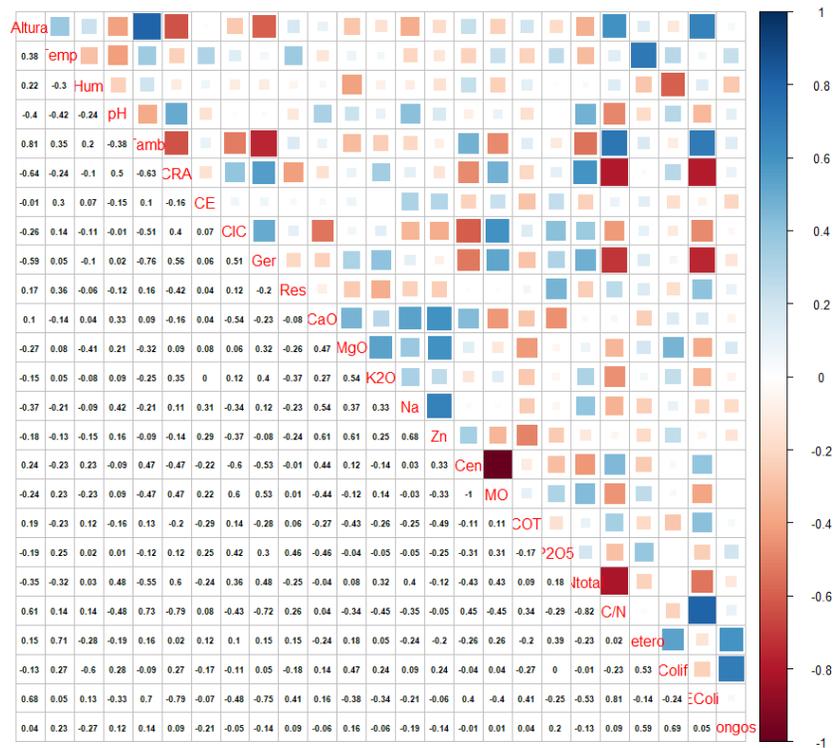
bajos de pH (Pandey et al., 2016). A los 30 días, al final de la fase termófila y en el inicio de la fase de enfriamiento, la *E. coli* registró un aumento significativo en su concentración hasta $49,90 \pm 42,17$ UFC/ 10 g, pero después de los 45 días las concentraciones fueron muy bajas y después de los 75 días las células de *E. coli* no fueron detectables. Esto indica que la supervivencia de *E. coli* en la PB puede durar potencialmente hasta la fase de enfriamiento.

2.3.4 Relación entre las variables fisicoquímicas y microbiológicas

Los resultados de la matriz de correlación (Figura 7) muestran una fuerte relación entre la altura de las PB y la temperatura ambiente (0,81), la capacidad de retención de agua (-0,64), el porcentaje de germinación (-0,59), la relación C/N (0,61) y la presencia de *E. coli* (0,68). Sin duda la altura en la PB es un indicador del proceso de descomposición; sugiriendo que, a mayor tiempo, menor altura y más avanzado es el proceso de la transformación de la materia orgánica (Ossa et al., 2020). La matriz de correlación no muestra una influencia significativa de la temperatura ambiente hacia los cambios en la temperatura promedio en el centro de la PB. Sin embargo, la temperatura promedio de la PB tiene una relación positiva con los cambios en la concentración de los microorganismos heterótrofos (0,71). Por otro lado, considerando que la PB está a la intemperie y los factores ambientales externos interactúan con los cambios de materia y energía en el sistema, se observa que la temperatura ambiente tiene una relación inversa y significativa con la capacidad de retención de agua del sustrato (-0,63), capacidad de intercambio catiónico (-0,51), porcentaje de germinación (-0,76), nitrógeno total (-0,55) y con los cambios en la concentración de materia orgánica (-0,47). Por otro lado, la temperatura ambiente presenta una relación directa y significativa con los cambios en la concentración de cenizas (0,47), la relación C/N (0,73) y los cambios en la concentración de *E. coli*.

Figura 7.

Matriz de correlación entre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos monitoreados en la PB durante el proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca.



Nota. Fuente elaborado por los autores.

En la Figura 7 también se observa una correlación entre la relación C/N con las cenizas (0,45), la materia orgánica (-0,45), el potasio total (-0,45), porcentaje de germinación (-0,72), la CIC (-0,43), la CRA (-0,79) y el pH (-0,48). Esto podría explicarse por la mineralización de los desechos orgánicos durante el proceso de descomposición y el aumento en la formación de compuestos inorgánicos. Se presenta además, una relación entre CRA y CIC (0,40), reflejando un aumento de ambos parámetros durante el proceso y, por lo tanto, su monitoreo es esencial para definir la calidad del abono o subproducto final. Por otro lado, la evidencia de una correlación entre la relación C/N y N total (-0,82), ratifica que la disminución en la relación C/N se ve afectada directamente por el N total, quien aumenta durante el proceso mientras el C no presenta cambios significativos. Aparte de las relaciones mencionadas, existen otras que, teniendo una menor magnitud de correlación, contribuyen a explicar el efecto que ciertas variables tienen en el desarrollo del proceso. Este es el caso de la CIC con el COT, CE, pH y N total, que son buenas indicadores de estabilidad del

sustrato; de hecho, han sido utilizados por varios autores para evaluar la calidad del abono o producto final (Defrieri et al., 2005; Durán & Henríquez, 2007; Gómez et al., 2006).

En el caso de los grupos microbianos evaluados, los heterótrofos tienen una correlación fuerte con la temperatura (0,71) y débil pero significativa con la humedad (-0,28), el pH (-0,19) y el fósforo total (0,39). Las coliformes totales presentaron una correlación fuerte con la humedad (-0,60), el magnesio total (0,47) y los heterótrofos (0,53), y débil con la temperatura (0,27), el pH (0,28) y la relación C/N (-0,23). La concentración de *E. coli* mostró una correlación significativa con la altura (0,68), temperatura ambiente (0,70), CRA (-0,79), CIC (-0,48), porcentaje de germinación (-0,75), respirometría (0,41), N total (-0,53), relación C/N (0,81), la concentración de cenizas (0,40) y la materia orgánica (-0,40). Los hongos, por su parte, no presentaron una correlación significativa con los parámetros fisicoquímicos, pero sí con los cambios en la concentración de coliformes totales (0,69) y los heterótrofos (0,59).

El análisis de componentes principales (PCA) permitió confirmar y resumir los resultados mostrados en la matriz de correlación e incluso extraer información adicional. Para el análisis se seleccionaron las variables fisicoquímicas que presentaron una correlación fuerte, las cuales permiten explicar el estado de madurez y calidad de la materia orgánica ya que inciden de manera significativa en el proceso de descomposición de los residuos en la PB, como es el caso de la temperatura promedio, pH, altura, temperatura ambiente, CRA, CIC, porcentaje de germinación, relación C/N, CaO, MgO, Na, Zn heterótrofos, hongos y coliformes totales.

En el análisis, la medida Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de adecuación de muestreo tuvo un valor de 0,48 lo que implica que la relación entre las variables es relativamente baja, ya que el coeficiente KMO es más adecuado cuanto mayor sea el valor. Ahora bien, este índice bajo se puede deber al tamaño de la muestra ya que el experimento contó con un número de 27 observaciones. Por otro lado, la prueba de esfericidad de Bartlett es significativa ($p= 3,09 \times 10^{-18}$), lo que indicaría que las variables seleccionadas son susceptibles de una reducción.

La rotación varimax de los resultados obtenidos por PCA permite agrupar los parámetros maximizando la varianza de cada uno de los factores o componentes obtenidos, por lo que la

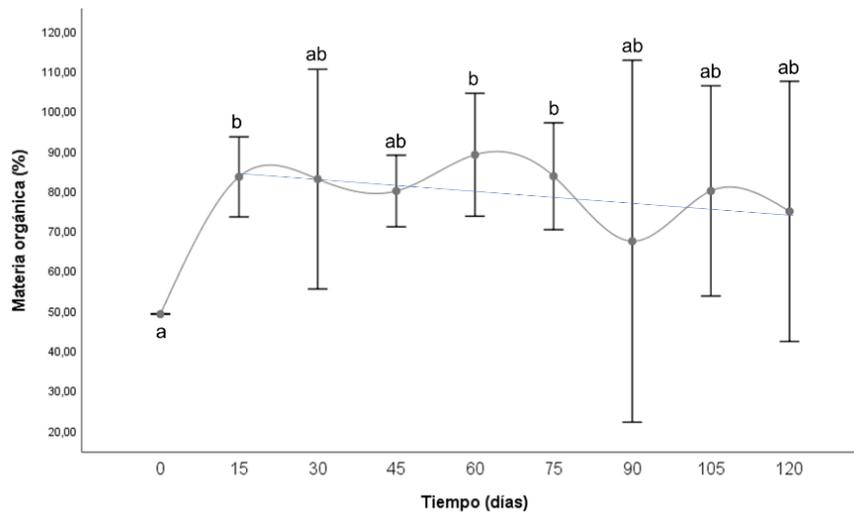
cantidad total de varianza se redistribuye sobre los factores extraídos. Las variables medidas en el proceso de descomposición de residuos orgánicos pueden agruparse en grupos o componentes, los cuales serán necesarios para explicar el proceso de descomposición o los cambios en la concentración de la materia orgánica en las PB. Los primeros cuatro componentes principales logran explicar el 80,3 % de la varianza total de los datos. El primer componente representa el 31 % de la varianza total, agrupa las variables fisicoquímicas como temperatura ambiente, porcentaje de germinación, relación C/N, altura, CRA y CIC. El segundo explica el 21,3 % de la varianza total de los datos e integra los elementos nutricionales como CaO, MgO, Na y Zn. El tercer componente explica el 18 % de la varianza total y está relacionado con los parámetros microbiológicos como los heterótrofos, hongos y coliformes totales. Finalmente, el cuarto componente explica el 10 % de la varianza en el cual se agrupan la temperatura promedio de la PB y el pH.

2.3.5 Cambios en la concentración de la materia orgánica durante el proceso de descomposición

Los cambios en la concentración de la materia orgánica de la mezcla inicial de residuos incorporados en la PB fueron de 49 %, un valor atípico y significativamente diferente a los registrados durante el proceso de descomposición (Figura 8). Sin embargo, los cambios presentados durante la fase termofílica (desde los 15 días) y de enfriamiento (hasta los 90 días) muestran una disminución progresiva desde $83,37 \pm 5,01$ % hasta $67,27 \pm 22,66$ %, respectivamente. Durante la fase de maduración la pérdida fue mucho menor, lo que indicaría cierta estabilidad del material y posiblemente la mayoría de las sustancias fácilmente biodegradables se metabolizaron durante la primera etapa del proceso, aun cuando se observa un gran porcentaje de materia orgánica disponible y remanente al final de la descomposición (120 días) con un valor de $74,72 \pm 16,28$ %.

Figura 8.

Variación de la materia orgánica (MO) durante el proceso de descomposición de residuos orgánicos en la PB.



Nota. Las barras de error representan \pm la desviación estándar para $n=3$. Valores con letras distintas indican que las medias son significativamente diferentes según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Los cambios en la concentración de la materia orgánica (variable dependiente) durante el proceso de descomposición de los residuos en la PB se pueden explicar mediante un modelo de regresión lineal, en el cual se incluyeron como variables independientes los cuatro componentes principales extraídos (Tabla 3) con sus respectivas puntuaciones, evaluadas de manera tipificada, es decir con media cero y desviación estándar uno. En la Tabla 3 se muestran los parámetros del modelo elegido, el cual tiene la forma de la ecuación 1. Los cuatro componentes independientes incluidos en el análisis explican el 82 % de la varianza de la materia orgánica, pues $R^2 = 0,82$. El ANOVA es significativo ($p= 0,000002$) lo que indica que alguno de los componentes tiene un efecto significativo y se relaciona estadística y linealmente con la materia orgánica; es decir, las variables explicativas aportan información en la explicación de los cambios en la concentración de la materia orgánica.

Tabla 3.

Parámetros del modelo de regresión lineal que describe los cambios en la concentración de la materia orgánica.

Modelo	Coefficientes	Desv. Error	t	Sig.	Límite* inferior	Límite superior
Constante	79,319	1,451	54,662	$1,8 \times 10^{21}$	76,270	82,368
Componente 1	-11,630	1,474	-7,891	$3,0 \times 10^{07}$	-14,726	-8,534

Modelo	Coefficientes	Desv. Error	t	Sig.	Límite* inferior	Límite superior
Componente 2	-5,769	1,428	-4,041	0,001	-8,768	-2,769
Componente 3	-1,135	1,438	-0,789	0,440	-4,157	1,887
Componente 4	3,460	1,590	2,176	0,043	0,120	6,800

Nota. (*) 95,0 % Intervalos de confianza para los coeficientes

Ecuación 1.

Modelo de regresión lineal que describe los cambios en la concentración de la materia orgánica.

$$MO = -11,63C_1 - 5,77C_2 - 1,14C_3 + 3,46C_4 + 79,32$$

La evaluación de la validez del modelo verifica el cumplimiento de los supuesto de colinealidad, al observar en la Tabla 4, que el factor de inflación de la varianza tiene valores cercanos a uno, así mismo, el índice de condición total, no superan el umbral de 30, por lo tanto no se presentan problemas de multicolinealidad. Por otro lado, al validar la normalidad de los residuales no estandarizados por medio de la prueba de Shapiro-Wilk, se encontró que los residuales siguen una distribución normal ($p= 0,056$). En cuanto a la homocedasticidad de los residuales, no se observó en los gráficos de dispersión algún patrón que represente heteroscedasticidad, pero si algunos valores atípicos o puntos de influencia, que no necesariamente ponen en entredicho la homogeneidad de la varianza. Finalmente, la autocorrelación residual evaluada por medio de la prueba de Durbin-Watson fue de 2,051 lo que indica que no hay autocorrelación en los residuales.

Adicional se revisaron los puntos atípicos y puntos de influencia, que son valores que cambian la relación de los datos, se efectuó por medio de las distancias de Cook y Mahalanobis encontrando la necesidad de retirar las observaciones 20, 21, 23 y 24, ya que estos alteran de manera importante los coeficientes de la regresión y sin ellos se logró encontrar la significancia de los componentes principales en el modelo y ajustar los resultados estadísticos a los principios teóricos. Excepto para el componente tres, el cual integra los grupos microbianos, heterótrofos, hongos y coliformes totales, estadísticamente en el modelo, el componente no es significativo ($p=0,440$) para explicar los cambios en la concentración de la materia orgánica en las PB, pero teóricamente, se conoce que las diferentes comunidades de microorganismos, principalmente bacterias y hongos, están implicados activa y sucesivamente en el proceso de descomposición de la materia orgánica con intensidad variable y dependen directamente de los parámetros fisicoquímicos como la

temperatura, el contenido de humedad, la relación C / N y la naturaleza de los materiales orgánicos frescos (Azim et al., 2018). A razón de lo anterior y teniendo claro que los cambios en la concentración de la materia orgánica en el tiempo se deben principalmente a la actividad microbiana, se eligió conservar el componente tres en el modelo de regresión descrito en la ecuación 1.

2.4 Conclusiones

La descomposición de los residuos de frutas borra de café y hojarasca en las PB es el producto de complejos procesos metabólicos microbianos que, sin el requerimiento del oxígeno, fermentan el material y utilizan el nitrógeno (N) y carbono (C) disponibles para producir su propia biomasa; además están en estrecha relación con las variables fisicoquímicas quienes influyen su presencia y dinámica. Así, el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos durante el proceso de descomposición mediante el uso de técnicas instrumentales permite comprender la transformación de la materia orgánica y evaluar su estado de calidad y madurez.

Los hallazgos de la presente investigación contribuyen al conocimiento de la dinámica de descomposición de los residuos orgánicos en las PB, lo cual puede ayudar a desarrollar estrategias ambientalmente viables y económicamente factibles en los planes de gestión integral municipal. Además, si el propósito es replicar la presente investigación incorporando otros tipos de residuos orgánicos, de acuerdo con los cuatro componentes principales encontrados a partir del PCA, se recomienda realizar el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos siguiendo tan solo la variación de la CIC, la relación C/N, CRA, el contenido de cenizas, heterótrofos y hongos. Dichas variables cumplen con los criterios de factibilidad económica y simplicidad técnica, permiten monitorear la calidad y madurez del abono así como el proceso de descomposición. Sin embargo, se sugiere incluir también los parámetros determinados in situ como la temperatura, pH, humedad y altura de la PB.

2.5 Agradecimientos

A los estudiantes de pregrado de la Universidad de Antioquia *José Daniel Arenas Villada; Sebastián Bedoya Álvarez; Leidy Marcela Cala Sánchez; Claire Grangeat; Laura Carolina Quiceno Botero* quienes participaron en la recolección de datos y monitoreo de las pacas biodigestoras que se utilizaron en la presente investigación, la cual se desarrolló en el marco del proyecto GIRO Sostenible UdeA 2019-2020.

2.6 Referencias

- ACODAL, S. N., & AMVA, Á. M. del V. de A. (2017). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional (PGIRS-R) 2017-2030*. Retrieved from [https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/plangestionintegral/02_Linea_Base/01_Parametros/02_Generacion_02-11\(Rev AMVA-ACOD\).pdf](https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/plangestionintegral/02_Linea_Base/01_Parametros/02_Generacion_02-11(Rev AMVA-ACOD).pdf)
- Acosta, Y., Zárraga, A., Rodríguez, L., Zauahre, M. El, & Ambientales, C. (2012). Cambios en las propiedades fisicoquímicas en el proceso de compostaje de lodos residuales. *Nº Extraordinario, 12*, 18–24.
- Albarracín Sánchez, D. M., Roa Parra, A. L., Roa Parra, A. L., Solano Ortega, F., Solano Ortega, F., Montañez Acevedo, G., & Montañez Acevedo, G. (2018). Producción de abono orgánico mediante el compostaje aerotérmico de residuos de poda. *Bistua Revista De La Facultad De Ciencias Basicas, 17*(1), 156–162. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2018.2939>
- Andrade, A., Tibaquirá, J. E., Restrepo, A., Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería, 12*(23), 40. <https://doi.org/10.31908/19098367.3701>
- Arango-Osorno, S., Montoya R., J., Vásquez, Y., & Flor, D. Y. (2016). Análisis fisicoquímico y microbiológico del proceso de co-compostaje a partir de biomasa de leguminosa y ruminaza. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 10*(2), 345–354. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5751>
- ARANGO-OSORNO, S., MONTROYA R., J., VÁSQUEZ, Y., & Y. FLOR, D. (2016). Physicochemical and microbiological analysis of co-composting process from biomass legume and bovine rumen. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 10*(2), 345–354. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5751>
- 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*(2), 38–55. Retrieved from

<http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1428/1/896-2554-1-PB.pdf>

- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. (2018, June 20). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, Vol. 8, pp. 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Arrigo, N., & Palma, R. M. (2003). Chemical and microbiological parameters for the characterisation of the stability and maturity of pruning waste compost. *Biology and Fertility of Soils*, 37(3), 184–189. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0584-7>
- Cardona Sánchez, J. D. (2018). *Caracterización fisicoquímica de las pacas biodigestoras en el proceso de tratamiento de la barra de café generada en la Universidad de Antioquia* (Universidad de Antioquia). Retrieved from <http://opac.udea.edu.co/cgi-olib/?infile=details.glu&luid=1525438&rs=13252368&hitno=1>
- Catalina Ossa-Carrasquilla, L., Andrés Correa-Ochoa, M., & María Múnera-Porras, L. (2020). La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica 1. *Producción + Limpia*, 15(2), 71–91. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., & Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*, 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
- Defrieri, R. L., Jimenez, M. P., Effron, D., & Palma, M. (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. *AgriScientia*, 22(1). Retrieved from <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/agris/article/view/2676/1904>
- Durán, L., & Henríquez, C. (2007). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 41–51.
- El Fels, L., Lemee, L., Ambles, A., & Hafidi, M. (2014). Identification and biotransformation of lignin compounds during co-composting of sewage sludge-palm tree waste using pyrolysis-GC/MS. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 92, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.04.001>
- Escobar, F., Sánchez Ponce, J., & Azero A., M. (2012). Evaluación del proceso de compostaje con diferentes tipos de mezclas basadas en la relación C/N y la adición de preparados biodinámicos en la Granja Modelo Pairumani. *Acta Nova*, 5(3), 390–410. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892012000100004&script=sci_arttext
- Fourti, O. (2013, March 1). The maturity tests during the composting of municipal solid wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 72, pp. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.001>
- Gómez, R. B., Lima, F. V., & Ferrer, A. S. (2006). The use of respiration indices in the composting

- process: a review. *Waste Management & Research*, 24(1), 37–47. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062385>
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220–232. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.09.008>
- Jara, M. A., Salazar, C. G., García, Y., Arteaga, Y., Rodríguez, Y., & Chafla, A. (2016). Parámetros físico-químicos y contenido de coliformes de un compost obtenido a partir de residuos orgánicos del Camal Frigorífico Riobamba Resumen. In *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología, ISSN-e 1390-5600, Vol. 5, N°. 3, 2016, págs. 252-263* (Vol. 5). Retrieved from Universidad Estatal Amazónica website: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6067739&info=resumen&idioma=SPA>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (© World Ba). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Khatua, C., Sengupta, S., Krishna Balla, V., Kundu, B., Chakraborti, A., & Tripathi, S. (2018). Dynamics of organic matter decomposition during vermicomposting of banana stem waste using *Eisenia fetida*. *Waste Management*, 79, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.043>
- Kuryntseva, P., Galitskaya, P., & Selivanovskaya, S. (2016). Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment. *Waste Management*, 58, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.031>
- Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., & Zhang, D. (2018, January 1). Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, Vol. 71, pp. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023>
- Makan, A., Assobhei, O., & Mountadar, M. (2013). Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(3), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-3>
- Martínez Salgado, M. M., Ortega Blu, R., Janssens, M., & Fincheira, P. (2019). Grape pomace compost as a source of organic matter: Evolution of quality parameters to evaluate maturity and stability. *Journal of Cleaner Production*, 216, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.156>
- Montejo, C., Costa, C., & Márquez, M. C. (2015). Influence of input material and operational performance on the physical and chemical properties of MSW compost. *Journal of Environmental Management*, 162, 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.059>
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.*

Bogotá.

- Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwoala, M. O., Iroh, I. N., & Ezeogu, L. I. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, *190*, 140–157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
- 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*. Universidad de Antioquia.
- Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L. F., Hoyos, L. V., Gonzales, S., Barrera, R., ... Sanchez, A. (2015). Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, *44*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.034>
- Pandey, P. K., Cao, W., Biswas, S., & Vaddella, V. (2016). A new closed loop heating system for composting of green and food wastes. *Journal of Cleaner Production*, *133*, 1252–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.114>
- Peltre, C., Nyord, T., Bruun, S., Jensen, L. S., & Magid, J. (2015). Repeated soil application of organic waste amendments reduces draught force and fuel consumption for soil tillage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *211*, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.004>
- Pulgarin Muñoz, C. E., & Wills Betancur, B. A. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Producción + Limpia*, *14*(1), 33–45. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/handle/10567/2659>
- Raj, D., & Antil, R. S. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*, *102*(3), 2868–2873. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.077>
- Renaud, M., Chelinho, S., Alvarenga, P., Mourinha, C., Palma, P., Sousa, J. P., & Natal-da-Luz, T. (2017). Organic wastes as soil amendments – Effects assessment towards soil invertebrates. *Journal of Hazardous Materials*, *330*, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.052>
- Rivera Espinosa, R., & Ossa Carrasquilla, L. C. (2017). Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México. *Textual*, (69), 85–101. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.69.005>
- Román, P., Martínez, M. M. & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Retrieved from www.fao.org/publications
- Saldarriaga, J. F., Gallego, J. L., López, J. E., Aguado, R., & Olazar, M. (2019). Selecting

- Monitoring Variables in the Manual Composting of Municipal Solid Waste Based on Principal Component Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 10(7), 1811–1819. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0208-y>
- Sarkar, S., Banerjee, R., Chanda, S., Das, P., Ganguly, S., & Pal, S. (2010). Effectiveness of inoculation with isolated *Geobacillus* strains in the thermophilic stage of vegetable waste composting. *Bioresource Technology*, 101(8), 2892–2895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.095>
- Silva Pérez, G. (2018). ¿Qué es la paca digestora silva? Un Reciclaje Orgánico Limpio y Saludable. *Revista TECSISTECATL*, 10(23). Retrieved from <https://www.eumed.net/rev/tecsistecat/n23/paca-digestora-silva.html>
- Soobhany, N. (2019, December 20). Insight into the recovery of nutrients from organic solid waste through biochemical conversion processes for fertilizer production: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 241, p. 118413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118413>
- Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Disposición Final de Residuos Sólidos. Informe Nacional - 2018*. Bogotá, Colombia.
- Terán S., J. M., Romero E., D., & Meneses O., L. (2018). Estudio de biodegradabilidad aeróbica de HDPE con aditivos degradables mediante compostaje. *InfoANALÍTICA*, 6(1), 67–82.
- Velázquez Cigarroa, E., Ossa Carrasquilla, L. C., Jarquín Sanchez, N., & Victorino Ramírez, L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal*, 2(3). <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703108C>

3 Análisis cromatográfico, fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico del abono obtenido de las pacas biodigestoras

Resumen

El presente estudio aplica el método de cromatografía circular de Pfeiffer y el análisis fisicoquímico, microbiológico, fitotóxico para identificar la calidad del abono extraído de una paca biodigestora, luego del proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca. Los componentes fisicoquímicos de los sustratos fueron cuantificados en laboratorio a través de diferentes técnicas, que permiten conocer sus características incluido el contenido de nutrientes. El desarrollo del análisis cromatográfico implicó un trabajo en campo y laboratorio para obtener los cromas y poder identificar las propiedades cualitativas del abono. Los resultados de este estudio proporcionan evidencia de que la cromatografía circular puede suministrar información completa y confiable sobre la calidad de los sustratos o abonos orgánicos y la información coincide con los datos suministrados por el laboratorio, en la cual los análisis reflejan que el abono obtenido es de buena calidad, posee una buena relación e interacción entre los minerales, la materia orgánica y los microorganismos, visibles en los atractivos colores del cromograma, amarillo, dorado, naranja y marrón claro, que se integran armónicamente entre las zonas. También se observa en las áreas marrones oscuras que hay gran actividad enzimática, reflejando que el proceso de descomposición aún no cesa y los microorganismos aún están trabajando. Aun cuando ya hay formación de propulsiones volcánicas que brotan de la zona enzimática, que es lo esperado, significa que falta poco para la estabilización y maduración completa del material, ante esto es posible considerar que es necesario extender la digestión uno o dos meses más. Sin embargo, el uso y aplicación del abono obtenido de las PB puede aportar al mejoramiento de las propiedades del suelo, aun cuando su estado no es completamente maduro y requiera más tiempo para su completa estabilización.

Palabras clave: abono, calidad, cromatografía, residuos orgánicos, suelo.

3.1 Introducción

El aprovechamiento de los residuos orgánicos como abono para la producción de alimentos o el mantenimiento de zonas verdes y jardines es una alternativa para la gestión integral de los residuos sólidos que los convierte en un recurso natural en lugar de un problema ambiental (Cerdea et al., 2018; Chew et al., 2018). En Colombia, cerca del 59 % de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) están constituidos por residuos de alimentos y de jardín. La disposición final del 81 % de los RSU se hace en los rellenos sanitarios y solo el 3.09 % se lleva a plantas de aprovechamiento (Andrade et al., 2018). Los impactos ambientales negativos generados por la cantidad de residuos orgánicos producidos, la mala disposición o el tratamiento convencional en rellenos sanitarios, trae como consecuencias el deterioro de la salud humana y la calidad ambiental (Sáez & Urdaneta, 2014). De acuerdo con Escalona Guerra (2014), los principales daños en el ambiente y la salud de las personas son causados por la disposición inapropiada en las fuentes hídricas o en botaderos a cielo abierto que contaminan el agua y el aire, y sin duda generan un deterioro paisajístico, que sumado al potencial aumento y proliferación de criaderos de vectores y roedores, propician la aparición y transmisión de enfermedades como malaria, dengue, parasitismo intestinal, entre otros.

Los residuos de alimentos contienen un alto porcentaje de componentes orgánicos como carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos orgánicos, lo que lo convierte en una materia prima apropiada para el cultivo de microorganismos (Chew et al., 2018). Asimismo, la borra de café o granos de café gastado está constituida por compuestos orgánicos como ácidos grasos, lignina, celulosa, hemicelulosa y otros polisacáridos que pueden aprovecharse como fuente de productos de valor agregado (Campos-Vega, Loarca-Piña, Vergara-Castañeda, & Dave Oomah, 2015). El reciclaje de nutrientes de los residuos orgánicos a través de procesos biológicos o químicos como: la paca biodigestora, compostaje, vermicompostaje, digestión anaerobia, la combustión con recuperación de calor y energía, gasificación, pirólisis y tratamiento mecánico biológico, contribuyen a conservar los recursos naturales, reducir la contaminación ambiental, preservar los sitios de disposición final y potenciar su valorización (Chew et al., 2018; Moreno Casco & Moral Herrero, 2008; Starovoytova, 2018).

Cerda et al. (2018) establecen que la valorización de los residuos orgánicos se lleva a cabo generalmente mediante el compostaje y la digestión anaeróbica; ambos procesos se basan en la degradación biológica de la materia orgánica, se utilizan ampliamente en todo el mundo, son una alternativa eficiente y ecológica que permiten obtener subproductos de valor agregado como el compost y el biogas, respectivamente. De acuerdo con Ossa-Carrasquilla et al., (2020) y Velázquez Cigarroa et al. (2017) la Paca Biodigestora (PB) se ha establecido como otro método viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos; fue desarrollado en Colombia y usado principalmente para la descomposición biológica de residuos de alimento y hojarasca por medio de la fermentación.

Según Rivera y Ossa (2017) llevar a cabo el tratamiento de los residuos orgánicos por medio de la PB tiene muchos beneficios sociales y ambientales, entre ellos se ha destacado la construcción de espacios formativos y de sensibilización entorno a las buenas prácticas ambientales, el consumo responsable y la soberanía alimentaria. Asimismo, su uso como jardineras y huertos durante la descomposición y la obtención de abono al final del proceso son maneras de aprovechar los residuos orgánicos por medio de este método. Según García et al., (2009) el abono es el producto sólido que se obtiene a partir de la estabilización de los residuos sólidos y de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO (1991), se utiliza como enmienda que al incorporarse en el suelo puede mejorar sus propiedades físicas, químicas, biológicas y con ello su fertilidad; sin embargo, el uso potencial del abono depende de la calidad y las características del mismo, así el aporte de nutrientes como de microorganismos está relacionado con los materiales orgánicos procesados y el método de descomposición utilizado (Herrán et al., 2008; Ansorena & Merino, 2014).

Para la determinación de la calidad del abono se pueden utilizar diferentes métodos: físicos, químicos, biológicos, microbiológicos, espectroscópicos, grado de humificación o cromatográficos (Iwegbue et al., 2006). Según Campitelli & Ceppi (2008) todos los parámetros que se refieren a la calidad en general deberían considerarse, especialmente los fisicoquímicos y microbiológicos, que por lo general cuantifican los macro y micronutrientes, humedad, Carbono Orgánico, relación C/N, pH, conductividad, cenizas, densidad, capacidad de retención de agua (CRA), capacidad de intercambio catiónico (CIC), el recuento total de microorganismos

heterótrofos, hongos, enterobacterias, *Salmonella sp.*, *Escherichia coli*, entre otros; se incluye también el tamaño de la partícula, el porcentaje de germinación y la actividad respirométrica.

Otro método que permite obtener información sobre la calidad del medio y sus partes, mas no sobre la cantidad de sus componentes, es la cromatografía en papel circular o cromatografía de Pfaiffer, una técnica utilizada para el análisis cualitativo de un medio sólido o líquido que se puede usar en suelos, compostas y biofertilizantes; permitiendo observar rápidamente la relación que guardan los microorganismos, la materia orgánica y los minerales (Medina Saavedra, Arroyo Figueroa, Peña Caballero, et al., 2018). Se trata de un método físico para la caracterización de mezclas complejas, mediante un conjunto de técnicas basadas en el principio de la retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla para identificar y, en muchos casos, para determinar su calidad (Restrepo R. & Pinheiro, 2011). Los parámetros de la cromatografía, se pueden identificar mediante la lectura del cromograma, algunos de ellos determinan el estado de descomposición de los materiales orgánicos, el contenido de humedad, la presencia de putrefacción, la disponibilidad de nutrientes, la integración de la fracción mineral y la materia orgánica a partir de una buena actividad biológica y permiten considerar la estabilidad o madurez del material para su posterior aprovechamiento y reincorporación en los suelos (Heredia, 2012; Medina-Saavedra et al., 2018; Restrepo R. & Pinheiro, 2015).

Aun cuando la mayoría de estudios experimentales evalúan la calidad del abono orgánico mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos debido a su precisión y confiabilidad científica, en algunos casos el método de la cromatografía también ha sido aplicado especialmente por su facilidad técnica y viabilidad económica, por ejemplo Hassold-Piezunka N., (2003) evaluó la idoneidad de las pruebas de cromatografía para determinar la calidad del compost y el grado de descomposición. Otros autores han aplicado la cromatografía para el análisis de la calidad del suelo (Heredia, 2012; Kokornaczyk, Primavera, Luneia, Baumgartner, & Betti, 2017; Medina Saavedra, Arroyo Figueroa, Peña Caballero, et al., 2018), la evaluación de su fertilidad (Javier & Santana, 2014; Vinet & Zhedanov, 2011), como una metodología apropiada en los procesos de la agricultura orgánica (Muñoz, 2011) y para identificar la calidad de productos orgánicos (Knorr, 1982). Por su parte, Restrepo R. y Pinheiro (2015) han planteado una

metodología para implementar el análisis cromatográfico de una muestra de abono orgánico adaptando los procedimientos aplicados en el estudio de muestras de suelo.

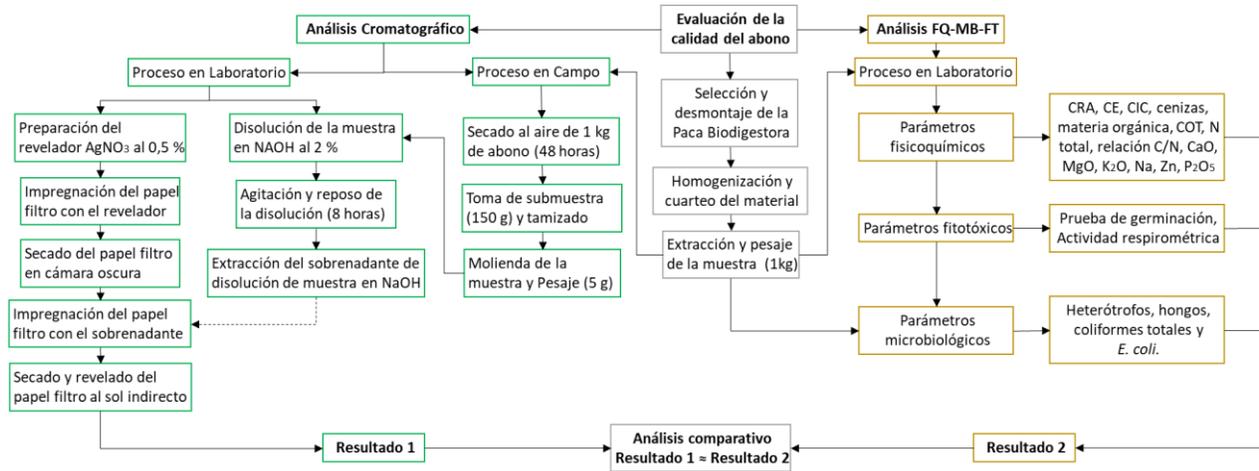
En el presente artículo se aplica la metodología y procesos descritos por los autores para realizar el análisis cromatográfico del abono orgánico generado en la paca biodigestora, a partir de la descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca, los resultados son comparados con el análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico obtenido en el laboratorio para evaluar la calidad del producto.

3.2 Metodología

La investigación fue desarrollada en las instalaciones del Campus Principal de la Universidad de Antioquia, ubicada en Medellín, Colombia, de donde también se obtuvieron los residuos orgánicos utilizados. Se implementó el método de la PB para digerir una mezcla de 15 kg de residuos de frutas y 15 kg de borra de café, que se ubicó en el núcleo o centro del sistema y se recubrieron con residuos vegetales (hojarasca) formando un cubo de 50 cm de arista. Se construyeron tres réplicas del montaje ($n=3$), con el propósito de evaluar la calidad del abono obtenido de las PB a los 120 días de descomposición de los residuos orgánicos incorporados mediante el análisis fisicoquímico, microbiológico, fitotóxico y cromatográfico. La Figura 1 describe el diagrama de proceso que se llevó a cabo durante el trabajo en campo y en laboratorio para obtener la información necesaria que permitió realizar un estudio comparativo entre los resultados de los diferentes análisis.

Figura 1.

Diagrama de proceso para la evaluación de la calidad del abono mediante el análisis fisicoquímico, microbiológico, fitotóxico y cromatográfico.



Nota. Fuente elaborado por los autores

Para llevar a cabo los análisis del abono, se realizó previamente un trabajo de campo que incluyó la construcción de las PB y el proceso de descomposición de los residuos orgánicos durante 120 días, tal como se observa en los pasos (i) al (v) de la Figura 2. Posteriormente, se hizo el desmontaje de las PB, se efectuó un proceso de homogenización y cuarteo del material obtenido de cada una y se extrajeron tres muestras de un Kg para los respectivos análisis fisicoquímico, fitotóxico, microbiológico y cromatográfico, correspondiente a los pasos (vi) y (vii) de la Figura 2. Para el análisis cromatográfico, se efectuaron adicionalmente los pasos (viii) al (x), en los cuales la muestra se secó al aire libre durante 48 horas, se extrajo una submuestra de 150 g que se pasó por un tamiz para lograr una mejor uniformidad de las partículas y con el auxilio de un mortero de porcelana se pulverizó la submuestra y finalmente se tomaron 5 g para el análisis.

Figura 2.

Procedimiento del trabajo en campo.





Nota. (i) Selección y pesaje de los residuos de frutas, borra de café y hojarasca. (ii) Preparación del terreno y ubicación del molde. (iii) Ensamblaje de las pacas biodigestoras. (iv) Retiro del molde. (v) Proceso de descomposición (120 días). (vi) Desmontaje de la paca biodigestora para extracción del abono. (vii) Homogenización, cuarteo y extracción de la muestra (1 kg/ análisis). (viii) Secado de la muestra al aire libre (48 horas). (ix) Toma de submuestra (150 g) y tamizado. (x) Molienda de la muestra y pesaje (5 g). Fuente: Elaborado por los autores.

Una vez completado el proceso en campo, relacionado con la extracción y preparación de las muestras de abono, se efectuó el procedimiento de laboratorio. Para el caso del análisis cromatográfico, se realizaron tres cromatogramas para cada muestra extraída de las tres PB ensambladas, con el propósito de seleccionar la mejor corrida del cromatograma para facilitar la lectura e interpretación. Se utilizó papel filtro circular marca Whatman N° 1288 de característica muy poroso y diámetro 183 mm. Se siguió la metodología propuesta por Kokornaczyk et al., (2017) y Restrepo R. y Pinheiro (2011) la cual inició con la preparación de la solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) o medio de disolución de la muestra de abono a una concentración del 2 %. Luego, se preparó el revelador, una solución de Nitrato de Plata (AgNO_3) al 0.5% con la que se impregnaron los papeles filtro y se dejaron secar en cámara oscura. En la Figura 3 se observa el procedimiento en el laboratorio para la obtención de los cromatogramas del abono de las PB.

Figura 3.

Procedimiento del trabajo de laboratorio para la obtención del cromatograma del abono de las pacas biodigestoras.





Nota. (i) Disolución de 5 g de la muestra en 50 mL de NaOH al 2 %. (ii) Agitación y reposo de la disolución (8 horas). (iii) Extracción del sobrenadante de la disolución de la muestra en NaOH. (iv) Preparación del revelador o Nitrato de Plata (AgNO_3) al 0.5 %. (v) Impregnación del papel filtro con el revelador. (vi) Secado del papel filtro impregnado con el revelador en una cámara oscura. (vii) Impregnación del papel filtro con el sobrenadante. (viii) Secado y revelado del papel filtro a la luz indirecta del sol. Fuente: Elaborado por los autores.

La interpretación de los cromas se realizó mediante el análisis de cada una de las zonas que lo componen (zona central, zona interna, zona intermedia, zona externa y zona de manejo o periférica). También se tuvo en cuenta el tamaño, forma, color, armonía e integración de sus partes reveladas, de acuerdo a los criterios de Restrepo R. & Pinheiro (2011). Para el análisis fisicoquímico, fitotóxico y microbiológico se utilizaron las dos muestras de abono restantes, obtenidas de cada PB. En el laboratorio del Grupo de Investigación de Estudios Moleculares - GIEM- de la Universidad de Antioquia se determinó la Capacidad de Retención de Agua (CRA) Conductividad Eléctrica (CE), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Carbono Orgánico Total (COT), Nitrógeno Total (NT), relación C/N, cenizas, porcentaje de germinación y respirometría (24 horas). Los cationes intercambiables Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio totales (CaO, MgO, KO y Na, respectivamente), así como el fósforo total (P_2O_5) y Zinc total (Zn).

Por otro lado, en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad de Antioquia, se desarrolló el análisis microbiológico para determinar el recuento de heterótrofos, hongos, coliformes totales y *E. coli*, mediante la siembra por superficie en agares selectivos y diferenciales. Cada siembra y conteo se realizó por triplicado de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por 10 g de sustrato. En la Tabla 1 se especifica la técnica y la norma de referencia para cada parámetro analizado.

Tabla 1.

Variable, técnica y norma de referencia de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinados en las muestras sólidas recolectadas durante la experimentación.

Parámetro	Técnica	Norma
Capacidad de retención de agua (CRA)	Gravimetría	NTC 5167
Conductividad	Potenciometría	NTC 5167
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Volumetría	NTC 5167
Porcentaje de germinación	Evaluación de la fracción hidrosoluble con el modelo biológico <i>Raphanus sativus</i>	Método interno
Respirometría (24 horas)	Titulométrica (producción CO ₂)	NTC 5167
Cenizas	Gravimetría	NTC 5167
Carbono Orgánico total	Titulométrica	NTC 5167
Nitrógeno total	Kjeldahl	NTC 370
Relación C/N	Cálculo matemático	NTC 5167
Calcio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Magnesio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Potasio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Sodio total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Zinc total	Electroforesis capilar	Método desarrollado GIEM
Fósforo total	Espectrofotometría	NTC 234
Heterótrofos	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
Hongos	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
Coliformes totales	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167
<i>E. coli</i>	Siembra por superficie según standards methods 9215c	NTC 5167

Por último, se realizó un análisis descriptivo comparando los resultados 1 y 2, especificados en la Figura 1, para determinar la calidad del producto final o abono obtenido del proceso de descomposición de residuos de frutas, borra de café y hojarasca en la PB. Previo a la comparación, los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos fueron evaluados con base a los estándares de calidad que se deben garantizar en materiales orgánicos sólidos para su comercialización, según la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167 de 2011.

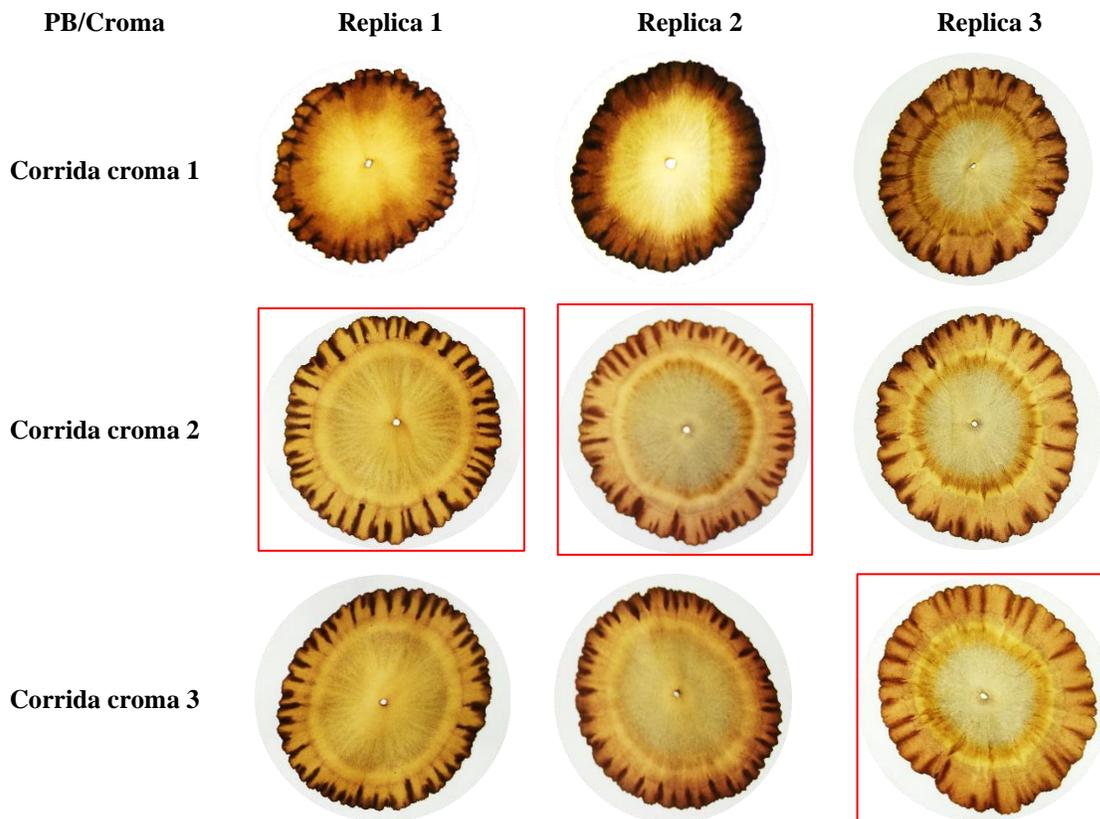
3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Análisis cromatográfico

En el análisis cromatográfico de las muestras de abono obtenida de la PB se generaron en totalidad nueve cromas, tres para cada replica de la PB. De cada replica se seleccionó un solo cromas, teniendo en cuenta el que se extendió mejor en el papel y presentó cada una de las fases con mejor definición para facilitar la lectura e interpretación. En la Figura 4, se muestran los cromas obtenidos para cada replica de la PB y se resalta en rojo los cromas elegidos.

Figura 4.

Resultados de los cromatogramas del abono de la paca biodigestora.



Nota. Los cromatogramas se realizaron en papel filtro N° 1288 marca Sartoriuscon y con NaOH a una concentración de 2 %, para cada una de las réplicas de la PB. Los cromas se hicieron por triplicado para seleccionar el de mejor calidad por muestra. Fuente: Elaborado por los autores.

La Figura 5 muestra la delimitación de las zonas en los cromas que presentaron mejor calidad. Por lo general, los colores deseados son amarillosos, anaranjado, rojizo o café claro que reflejan el buen estado evolutivo y saludable del sustrato. Sin embargo, cuando en un croma se encuentran tonalidades de cafés muy oscuros, es indicador de un proceso intermedio de desarrollo, en el cual la materia orgánica está cruda, acumulada o en etapa de maduración. Por otro lado, las coloraciones no deseadas en un croma están representadas por colores negro, ceniza, café oscuro, lila, violeta, gris o escala de azules que reflejan el mal estado evolutivo y no saludable del abono (Restrepo R. & Pinheiro, 2011).

Figura 5.

Identificación de las zonas de los cromatogramas para cada una de las réplicas de la PB.



Nota. Fuente elaborado por los autores

En los cromas evaluados, se logra observar la integración de la zona central, interna e intermedia. La zona central, indica el contenido de oxígeno y nitrógeno presente en la sustancia, se ubica en el área más próxima al centro del papel filtro, su coloración amarillosa y pardo claro se van desvaneciendo uniforme y armónicamente hasta la siguiente zona, lo cual es un indicador de buena estructura acompañada de buena aireación. Medina et al. (2018) informaron a partir del análisis realizado a los cromatogramas de muestras de suelo obtenidas de diferentes sistemas productivos, que en la zona central un color blanco parduzco se debe a la presencia de compuestos nitrogenados. Sin embargo, en el sistema orgánico a diferencia del convencional y temporal, un color café claro integrado a las siguientes zonas, indica la buena estructura, actividad biológica eficiente, buena cantidad de materia orgánica y señal de buena salud del sustrato.

La zona interna o zona mineral, indica la presencia de minerales en el abono. Se distingue porque generalmente presenta una coloración más oscura, entre café y marrón que varía de tonalidad según

el estado de mineralización de la materia orgánica. El tono marrón y verdoso que reflejan los cromas demuestran que, en el sustrato analizado, aunque se evidencia buena cantidad de minerales que pueden ser benéficos para las plantas, las proporciones biodisponibles pueden ser mayores si se elige prolongar el tiempo de descomposición del material. En su investigación, Medina et al. (2018) encontraron en los cromas evaluados, que la franja minera presentó una mejor condición en los sistemas orgánicos, mediante la presencia de una coloración café claro que se integra a las demás zonas y refleja una cantidad suficiente de minerales disponibles para las plantas.

La zona intermedia o proteica muestra los procesos de transformación de las sustancias. Puede presentar diferentes colores como amarillo, marrón, café u otros, pero con diferentes tonos. El tono café que se observa en los cromas analizados, presenta una diferencia entre el café que procedía de la zona interna, cambia el desvanecimiento, pero sigue con buena interrelación, con un tono que indica gran presencia de materia orgánica disponible en la muestra, pero que acorde con la fase mineral aún no ha sido transformada o degradada completamente.

En la zona externa o enzimática, se manifiesta la presencia de humus, las ondulaciones y lunares suaves son indicativo de la relación de la materia orgánica con los minerales y los microorganismos. En los cromas evaluados, la zona externa no se manifiesta de forma gradual y armónica con nubes onduladas muy tenues o lunares suaves de colores café, contrario a ello, se presenta de manera densa, lo que significa que aún hay demasiada actividad enzimática y microbiológica, lo cual puede suceder debido a la gran disponibilidad de materia orgánica sin descomponer. Sin embargo, los tonos reflejados también indican que el sustrato en análisis es saludable y está libre de organismos patógenos, a pesar de que aún no ha llegado a su madurez y requiere mayor tiempo de descomposición.

La interpretación de la zona externa se complementa con la terminación del croma que presenta forma de granos de maíz, una terminación no deseada cuando se trata de identificar un abono orgánico totalmente maduro. Aunque si se observa con detenimiento, pequeñas franjas con forma de erupciones de volcanes, de tonos más oscuros, que emergen de la zona intermedia, reflejando que el tiempo que falta para culminar su digestión es poco, pues estas formas nos características de un croma ideal según Restrepo R. & Pinheiro (2011). Senthil Kumar et al. (2014) observaron en

romas realizados a muestras de vermicompost obtenidas a los 80 días del proceso de descomposición, la presencia de un color marrón uniformemente distribuido en la zona externa o periférica, lo cual indica la presencia de sustancias de humus en las muestras finales, y se convierte en un signo de madurez cuando coincide con un valor de pH neutro (5-7).

Con relación a los colores vivos, naranjas y amarillos, visibles en el cromograma, los cuales son indicadores indirectos de buena calidad, la muestra de abono orgánico analizada se encuentra dentro del rango tonal admisible que permite reconocerla como un sustrato apto para dotar de beneficios físicos, químicos y biológicos al suelo y a la microbiota donde sea aplicado. Las haces radiales que se observan desde el centro hasta afuera pero que se detienen con una delgada línea café visible en la Figura 5, son indicador de una adecuada combinación entre los minerales, la materia orgánica y la actividad enzimática, aunque refleja que aún hay gran actividad microbiana o de descomposición.

3.3.2 Análisis fisicoquímico

La evaluación de la calidad del abono realizado en el laboratorio del grupo GIEM, arrojó una serie de resultados para cada parámetro considerado, como se observa en la Tabla 2. La NTC 5167 (2011) establece el valor óptimo para cada parámetro, si la muestra analizada cumple o no con los niveles máximos permisibles determinando su estado y calidad.

Tabla 2.

Parámetros fisicoquímicos de la muestra de abono comparados con la NTC 5167 (2011).

Parámetros	Resultado GIEM*	Unidad	Valor óptimo	Cumple**
Cenizas	25,28±16,28	%	Máximo 60	Cumple
CIC	53,33±11,37	meq/100 g	Min. 30	Cumple
COT	33,67±7,19	%	Mínimo 15	Cumple
CE	1,08±0,09	dS/m	Menor 3	Cumple
CRA	145±13,21	%	Mínimo 100	Cumple
Humedad	76,67±15,28	%	Máximo 30	No cumple
N total	2,49±0,86	%	> 1	Cumple
pH	5,83±0,29	-	>4 <9	Cumple
Relación C/N	15,75±9,79	-	Menor a 20	Cumple

Nota. (*) Los valores son las medias \pm desviación estándar (n = 3). (**) La muestra analizada cumple o no con los estándares de calidad establecidos por la NTC 5167 de 2011.

El contenido de cenizas representa el grado de mineralización de la materia orgánica y refleja el porcentaje de sustancias inorgánicas no volátiles presentes en la muestra analizada, su valor aumenta a medida que transcurre el proceso de digestión, debido a que los elementos como el nitrógeno y fósforo son mineralizados (Arango-Osorno et al., 2016). La muestra en análisis reportó un valor de $25,28 \pm 16,28$ %, inferior al 60% que es el nivel máximo permisible.

La CIC refleja la capacidad que tiene el abono para liberar cationes del suelo, como potasio, calcio y magnesio y dejarlos como nutrientes disponibles para ser utilizados por las plantas. Niveles mayores a 30 meq/100 g representan un buen contenido de sustancias húmicas, característico de abonos de buena calidad (Bravo et al., 2017). El valor reportado es de $53,33 \pm 11,37$ meq/100 g, reflejando una buena CIC en la muestra analizada.

El porcentaje de COT expresa la concentración a la que se encuentra este nutriente en la muestra de abono. Según la NTC 5167 (2011) cuando el porcentaje es mayor al 15% representa un sustrato de buena calidad, como es el caso del abono obtenido de la PB que tiene un porcentaje de $33,67 \pm 7,19$ %. Al igual que el carbono, el nitrógeno total es uno de los macronutrientes más importantes en la materia orgánica transformada; un buen porcentaje de nitrógeno en un sustrato debe estar entre 2 % y 3 %. El valor registrado de nitrógeno total en la muestra fue de $2,49 \pm 0,86$ %, lo cual significa que el material inicial incorporado contenía una cantidad de componentes orgánicos que favorecieron la presencia de nitrógeno en el abono, como es el caso de la borra de café.

Resultados similares fueron encontrados por Azim et al. (2018) donde estudiaron el monitoreo de parámetros durante la descomposición de residuos orgánicos, encontrando para el caso del COT una disminución debido a que los microorganismos degradan las sustancias orgánicas necesarias para su metabolismo, lo que lleva a su mineralización como dióxido de carbono (CO₂). Así mismo, en el proceso el nitrógeno se mineraliza rápidamente, una fracción del nitrógeno mineral se reincorpora en el metabolismo microbiano activo durante la descomposición y la otra parte restante se libera en forma de nitrógeno inorgánico. Por lo tanto, al final del proceso se observa generalmente un aumento en la concentración del nitrógeno total en el abono maduro.

La relación C/N refleja el estado de madurez y la estabilidad de la materia orgánica, el valor registrado de $15,75 \pm 9,79$ es menor a 20, lo cual cumple con el nivel óptimo indicado por la NTC 5167 (2011). Algunos autores consideran que un valor cercano a 15 determina un grado de madurez mayor (Ansorena, Batalla, & Merino, n.d.; Durán & Henríquez, 2007; García et al., 2009); lo que significa que la muestra de abono analizada está cerca de alcanzar un estado de madurez apropiado. Sahu et al. (2020) estudiaron la dinámica de los índices de madurez y estabilidad durante la descomposición de residuos urbanos biodegradables, observaron que el crecimiento microbiano condujo a una mayor disminución de la relación C/N ya que estos en su metabolismo utilizan el carbono fácilmente degradable y el nitrógeno como fuente de energía, en este caso cuando los residuos fueron inoculados con consorcios microbianos alcanzaron a los 30 días una relación de 11,85, significativamente diferente a la muestra que no tenían inóculo microbiano, que reflejó en el mismo tiempo una relación de 24,84.

La CE en una muestra de abono condiciona la posibilidad de germinación de las semillas y el crecimiento o desarrollo de las plantas, ya que el nivel de sales disueltas puede afectar en gran medida dichos procesos. Una cantidad menor de 3 dS/m representa un abono de buena calidad, así, el abono analizado con una C.E de $1,08 \pm 0,09$ dS/m puede considerarse que es apto para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Azim et al., 2018).

La CRA reportada para el abono de la PB fue de $145 \pm 13,21$ %, la NTC 5167 (2011) estipula como valor óptimo que la capacidad debe ser mínimo su propio peso, lo que significa que dicho porcentaje cumple a cabalidad con lo recomendado y su uso como abono orgánico puede favorecer la humedad de los suelos, su porosidad y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya que no se pierden por lixiviación. Debido a la adecuada CRA se espera que el porcentaje de humedad sea el adecuado, lo reportado corresponde a una cantidad del $76,67 \pm 15,28$ % el cual supera el nivel máximo permisible que es de 35 %, según la NTC 5167 (2011). El exceso de humedad encontrado puede deberse a los eventos de alta precipitación y bajas temperaturas durante el último periodo de descomposición, lo que llevó a que el material adquiriera altas cifras en dicho parámetro.

El pH reportado para la muestra es de $5,83 \pm 0,29$, el cual significa que el abono se encuentra en su proceso de estabilización y alcalinización debido a que dicho valor está entre el rango óptimo, el

cual es representativo de abonos aptos para su uso en los suelos. Resultados equivalentes encontraron Velázquez et al. (2017) para muestras de abono extraído de PB ensambladas en Colombia y México, donde a los seis meses de descomposición los valores se encontraron en el rango de la neutralidad con cantidades de 7,12 y 7,96 respectivamente. Lo cual es consecuente con lo mencionado por Bravo et al. (2017) donde el pH final obtenido en el abono muestra una tendencia a la alcalinización, ya que su evolución durante la descomposición es afectada por la pérdida de ácidos orgánicos y la generación de amoníaco, originadas por la descomposición de las proteínas.

El tamaño de las partículas del abono incide en la porosidad de los suelos, lo que facilita o perjudica la retención de nutrientes y de agua. Las muestras analizadas contenían el 100 % en peso seca un tamaño de partícula mayor a 2 mm. De acuerdo con Soliva y López (2004) un abono de buena calidad debe estar compuesto por partículas menores o iguales a 2 mm, en consecuencia, el abono producido en la PB aunque puede considerarse apropiado para su uso y manejo, ya que facilita la circulación de aire y agua, es imprescindible prolongar el tiempo de descomposición para garantizar las condiciones óptimas antes de su incorporación en el suelo.

El contenido de macro y micronutrientes definen la calidad del abono, además cuando este es aplicado en los suelos, favorece el crecimiento y desarrollo de las plantas si su contenido es suficiente. Según García (1990) una cantidad superior al 1 % representa una buena disponibilidad del nutrientes en el abono. En concordancia, la Tabla 3 muestra el contenido de macro y micronutrientes presentes en la muestra; según lo observado, sólo el N y el Ca total superan el 1 %. Aunque los análisis reflejen que nutrientes como el K, P, Mg, Na y Zn no superan la cantidad óptima del 1 %, están presentes en el abono.

Tabla 3.

Contenido de macro y micronutrientes en la muestra de abono

Parámetro	Expresado como	Resultado	Desviación estándar	Unidades
Nitrógeno total	N	2,49	0,86	%
Potasio total	K ₂ O	0,92	0,75	%
Fósforo total	P ₂ O ₅	0,47	0,59	%
Magnesio total	MgO	0,44	0,35	%
Sodio total	Na	0,11	0,11	%
Calcio total	CaO	4,48	5,56	%
Zinc total	Zn	0,014	0,013	%

3.3.3 Análisis microbiológico

Los análisis microbiológicos realizados al abono incluyeron la estimación de cuatro grupos microbianos (heterótrofos, hongos, coliformes totales y *E. coli*) los cuales determinan la calidad sanitaria e higiénica del material y su aptitud para distintos usos en los suelos (Laich, 2011; Pucha et al., 2015). Los microorganismos cuantificados en la muestra analizada se observan en la Tabla 4, los cuales están expresados en Unidades Formadoras de Colonias por 10g de sustrato (UFC / 10 g).

Tabla 4.

Recuento de microorganismos en la muestra de abono

Parámetro	Resultado	Unidades
Heterótrofos	2,13± 0,24(x10 ⁸)	UFC/10 g de sustrato
Hongos	3,95± 0,80(x10 ⁶)	UFC/10 g de sustrato
Coliformes totales	47,28± 78,57(x10 ⁶)	UFC/10 g de sustrato
<i>E. coli</i>	< 1	UFC/10 g de sustrato

Nota. Los valores son las medias ± desviación estándar (n = 3).

La presencia de heterótrofos y hongos en las cantidades reportadas, dan a entender que aún el abono orgánico tiene gran actividad biológica, lo que significa que el proceso de descomposición no ha culminado en la PB. En este caso, luego de 120 días de fermentación la materia orgánica todavía se encuentra en la fase de maduración por ende no se puede considerar un abono completamente estabilizado, pero dicha condición podrá lograrse con 30 a 60 días más de actividad microbiana de descomposición y obtener valores de similares a los encontrados por Velázquez et al. (2017) donde las características del material cumplen con los niveles óptimos de calidad establecidos por la NTC 5167 (2011).

Así mismo, la ausencia de *E. coli* representa que el abono orgánico obtenido de la PB cumple con las condiciones de calidad óptimas establecidas por la NTC 5167 (2011), lo cual permite su uso y hace factible su integración a los suelos. Además, esta condición también significa que el método de la PB es eficiente para inhibir la reproducción y propagación de los organismos patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud de los suelos y el desarrollo de las plantas. Esto sucede, principalmente por los niveles de máxima temperatura (> 50 °C) que alcanza la PB durante el

proceso de descomposición, lo cual permite inhibir el desarrollo de organismos patógenos y obtener un producto final estable y rico en sustancias nutritivas para el suelo (Ardila et al., 2015).

Las coliformes totales reportados corresponden a una cantidad menor a 1000 UFC/g y según lo establecido por Román et al. (2013) los microorganismos patógenos han sido eliminados y la concentración remanentes de coliformes totales no son perjudiciales para la salud del suelo o calidad del abono, por el contrario, participan en el proceso de fermentación y estabilización final del material.

3.3.4 Parámetros fitotóxicos

Las Tablas 5 y 6, corresponden en su orden a los resultados de la prueba de germinación y la actividad respirométrica de la muestra de abono analizada. El primero, indica el grado de madurez del abono, el cual es favorable cuando supera el 50 % de acuerdo con la NTC 5167 (2011). El segundo, representa el nivel de estabilidad del abono, el cual se considera apropiado cuando su valor es menor a 5 mg CO₂/g según la NTC 5167 (2011).

Tabla 5.

Prueba de germinación de la muestra de abono.

Muestra	Concentración		% Germinación
	(% P/V) Muestra sólida	(% V/V) Muestra líquida	
Testigo	0		100
Abono orgánico	10		86,67±2,89

Tabla 6.

Actividad respirométrica de la muestra de abono.

Muestra	Parámetro	Resultado	Unidades
Abono orgánico	Respirometría 24 horas	2,11±1,46	mg (CO ₂)/g

Según lo reportado, el abono orgánico analizado contiene un grado de madurez y de estabilidad aceptable debido a que la prueba de germinación obtuvo un porcentaje del 86,67±2,89 % y la actividad respirométrica una cantidad de 2,11±1,46 mg CO₂/g. Además, es factible afirmar que dicho abono no representa un potencial fitotóxico para los suelos donde se aplique, por lo contrario,

favorece y enriquece las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos, contribuyendo a su productividad y mejorando la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Acosta et al., 2006; Longoria et al., 2014).

3.4 Conclusiones

El abono es el producto final del proceso de fermentación inducido en la PB, representa la viabilidad ambiental de reciclar los residuos orgánicos y los efectos positivos en los suelos debido a su aprovechamiento y aplicabilidad. En concordancia con lo observado en los análisis cuantitativo y cualitativo realizados, el sustrato que se obtiene la mayoría de las variables cumplen y se encuentran dentro de los rangos permitidos y aceptados, en términos de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos establecidos por la NTC 5167 (2011).

De acuerdo con la NTC 5167 (2011) es posible considerar que la muestra es un abono de buena calidad, con buena CIC y de CRA; el cual, puede ser usado para mejorar la disponibilidad de nutrientes en los suelos, en especial por su aporte de C, N, K, P, Mg y Ca. Además, por su baja CE favorece la germinación de semillas y el crecimiento de las plantas. El pH reportado, representa un sustrato con un grado de madurez aceptable, con una relación C/N por debajo del nivel máximo permisible, pero muy cerca de ser un sustrato completamente estabilizado biológicamente. El abono se encuentra libre de patógenos y de compuestos contaminantes o fitotóxicos, lo que lo hace favorable y óptimo para su uso en zonas verdes, jardines o cultivos.

De otro lado, la cromatografía del abono de la PB pudo corroborar que el sustrato posee una buena relación e interacción entre los minerales, la materia orgánica y los microorganismos, visibles en los atractivos colores del croma, amarillo, dorado, naranja y marrón claro, que se integran armónicamente entre las zonas. También se observa en las áreas marrones oscuras que hay gran actividad enzimática, reflejando que el proceso de descomposición aún no cesa y los microorganismos aún están trabajando. Aun cuando ya hay formación de propulsiones volcánicas que brotan de la zona enzimática, que es lo esperado, significa que falta poco para la estabilización y maduración completa del material, ante esto es posible considerar que es necesario extender la digestión uno o dos meses más.

En general, los análisis coinciden en sus resultados, el uso de uno u otro está determinado por la necesidad en particular. En el caso de la cromatografía, si bien es viable por su facilidad técnica y los bajos costos no es el método más apropiado cuando se quiere comparar o evaluar una muestra a la luz del marco normativo, lo que sí es posible con el análisis fisicoquímico, microbiológico y fitotóxico. Por otro lado, si el objetivo es conocer la calidad del abono para evaluar o considerar posibles usos, cualquier método es apropiado por separado o en conjunto.

3.5 Referencias

- Acosta, Y., Cayama, J., Gómez, E., Reyes, N., Rojas, D., & García, H. (2006). Respiración microbiana y prueba de fitotoxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *MULTICIENCIAS*, 6, 220–227. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/904/90460303.pdf>
- Andrade, A., Tibaquirá, J. E., Restrepo, A., Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23), 40. <https://doi.org/10.31908/19098367.3701>
- Ansorena, J., Batalla, E., & Merino, D. (n.d.). *Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos*.
- Ansorena, J., & Merino, E. B. D. (2014). Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos. *Escuela Agraria Fraisoro*, 1–67.
- Arango-Osorno, S., Montoya R., J., Vásquez, Y., & Y. Flor, D. (2016). Physicochemical and microbiological analysis of co-composting process from biomass legume and bovine rumen. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 345–354. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i2.5751>
- 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(2), 38.
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., & Thami Alami, I. (2018, June 20). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, Vol. 8, pp. 141–158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- Bravo, E. L., Javier, A., Rivera, A., Suárez, M. H., Gonzalez Cueto, O., & García De La Figal Costales, A. (2017). Properties of a compost obtained starting from residuals of the production of cane sugar. *Centro Agrícola*, 44(3), 49–55. Retrieved from <http://cagricola.uclv.edu.cu>
- Campitelli, P., & Ceppi, S. (2008). Chemical, physical and biological compost and vermicompost

- characterization: A chemometric study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90(1), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.08.001>
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., & Dave Oomah, B. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2015.04.012>
- Catalina Ossa-Carrasquilla, L., Andrés Correa-Ochoa, M., & María Múnera-Porras, L. (2020). La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica 1. *Producción + Limpia*, 15(2), 71–91. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a4>
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrera, R., Gea, T., & Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*, 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Show, P. L., Ling, T. C., Arya, S. S., & Chang, J. S. (2018). Food waste compost as an organic nutrient source for the cultivation of *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 267, 356–362. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.07.069>
- Durán, L., & Henríquez, C. (2007). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 41–51.
- Escalona Guerra, E. (2014). Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(2), 270–277. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1561-30032014000200011&script=sci_arttext&tlng=pt
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, I. (1991). Manejo del suelo: Producción y uso del compostaje en ambientes tropicales y subtropicales. *Boletín* (56): 180. Retrieved from https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=WgZ47ud_bpoC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Manejo+del+suelo++producción+y+uso+del+compost+en+ambientes+tropicales+y+subtropicales&ots=fSY4Oo1QeC&sig=H4ZJxdzJ-Bi7gx19M5FkgK0pqqdw&redir_esc=y#v=onepage&q=Manejo del suelo pr
- Félix Herrán, J. A., Sañudo Torres, R. R., Rojo Martínez, G. E., Martínez Ruiz, R., & Olalde Portugal, V. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai*, 4(1), 57–68. <https://doi.org/10.35197/rx.04.01.2008.04.jf>
- García, F., Gil, P., & Carrillo, A. (2009). CARACTERIZACIÓN Y CALIDAD DE UN ABONO ORGÁNICO FERMENTADO AOF PREPARADO CON RESIDUOS DEL PROCESO DE INDUSTRIALIZACIÓN DE LA PAPA (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 1(1), 69–80. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/5177/517751797005.pdf>
- García Izquierdo, C. J. (1990). *Estudio del compostaje de residuos orgánicos : valoración agrícola*

/ Carlos Javier García Izquierdo ; directores Francisco Costa Yagüe, M^a Teresa Hernández Fernández.

- Hassold-Piezunka N. (2003). *Eignung des Chroma-Boden-tests zur Bestimmung von Kompostqualität und Rottegrad [Idoneidad de las pruebas de croma en el suelo para determinar la calidad del compost y el grado de descomposición]* .
- Heredia, C. A. R. (2012). *Análisis de un sistema de cromatografía de campo para evaluación de calidad de suelos y compost en empresas asociadas a Ecofas* (Escuela Politécnica del ejército). Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8043/1/T-ESPE-IASA I-004749.pdf>
- Javier, F., & Santana, A. (2014). “*Evaluación cualitativa mediante cromatografía de la fertilidad de cinco suelos con diferentes manejos orgánicos y convencionales.*”
- Knorr, D. (1982). *Use of a Circular Chromatographic Method for the Distinction of Collard Plants Grown under Different Fertilizing Conditions.* 1(1), 29–38. <https://doi.org/10.1080/01448765.1982.9754375>
- Kokornaczyk, M. O., Primavera, F., Luneia, R., Baumgartner, S., & Betti, L. (2017). Analysis of soils by means of Pfeiffer’s circular chromatography test and comparison to chemical analysis results. *Biological Agriculture & Horticulture*, 33(3), 143–157. <https://doi.org/10.1080/01448765.2016.1214889>
- Laich, F. (2011). *El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje*. Retrieved from <https://www.icia.es/biomusa/en/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/65-el-papel-de-los-microorganismos-en-el-proceso-de-compostaje/file>
- Longoria Ramírez, R., Antonio, M., Salazar, O., Torres Sandoval, J., Luis González, J., Sandoval, R., & Maximiliano Méndez, G. (2014). Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje Design, construction and tests of an automatic prototype for composting. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N*, 70, 185–196.
- M.A. Iwegb, C., . A. . E., . F. N. E., & . N. O. I. (2006). Compost Maturity Evaluation and its Significance to Agriculture. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9(15), 2933–2944. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2006.2933.2944>
- Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., & Peña Caballero, V. (2018). Cromatografía de Pfaiffer en el análisis de suelos de sistemas productivos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 665–673. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1223>
- Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., Peña Caballero, V., Medina Saavedra, T., Arroyo Figueroa, G., & Peña Caballero, V. (2018). Cromatografía de Pfaiffer en el análisis de suelos de sistemas productivos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 665–673. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1223>
- Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa.

- Muñoz, S. M. A. (2011). *Comparación Del Análisis Químico Convencional De Suelos Con La Técnica De Cromatografía Para Agricultura Organica En Transición*. 464.
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Bogotá.
- Pucha, A., Ramos, R., Morales, R., Novoa, V., & Romero, F. (2015). Verificación y cuantificación de microorganismos involucrados en el proceso de compostaje aerotérmico de residuos de producción orgánica certificada. In *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia*. Retrieved from <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/5.-Verificacion-y-Cuantificacion.pdf>
- Restrepo R., J., & Pinheiro, S. (2011). *Cromatografía: imagenes de vida y destrucción del suelo* (COAS editores, Ed.). Cali, Colombia.
- Rivera Espinosa, R., & Ossa Carrasquilla, L. C. (2017). Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México. *Textual*, (69), 85–101. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.69.005>
- Román, P., Martínez, M. M. &, & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Retrieved from www.fao.org/publications
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. In *Omnia Año* (Vol. 20). Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Sahu, A., Manna, M. C., Bhattacharjya, S., Rahman, M. M., Mandal, A., Thakur, J. K., ... Patra, A. K. (2020). Dynamics of maturity and stability indices during decomposition of biodegradable city waste using rapo-compost technology. *Applied Soil Ecology*, 155, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103670>
- Senthil Kumar, D., Satheesh Kumar, P., Rajendran, N. M., Uthaya Kumar, V., & Anbuganapathi, G. (2014). Evaluation of vermicompost maturity using scanning electron microscopy and paper chromatography analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(13), 2738–2741. <https://doi.org/10.1021/jf4054403>
- Soliva, M., & López, M. (2004). Calidad del compost : Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. *Formación de Técnicos Para El Tratamiento y Gestión de Lodos de Depuradora Valsain CENEAMMIMAM 1*, 1–20. Retrieved from <http://gidr.gesfer.cat/tractaments/els-principals-tractaments/calidad-compost-lodos.pdf>
- Starovoytova, D. (2018). Solid Waste Management (SWM) at a University Campus (Part 1/10): Comprehensive-Review on Legal Framework and Background to Waste Management, at a Global Context. *Journal of Environment and Earth Science*, 8(4). Retrieved from www.iiste.org
- Velázquez Cigarroa, E., Ossa Carrasquilla, L. C., Jarquín Sanchez, N., & Victorino Ramírez, L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues.

AGROFOR International Journal, 2(3). <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703108C>

Vinet, L., & Zhedanov, A. (2011). A 'missing' family of classical orthogonal polynomials. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8), 085201. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

4 Gestión integral de residuos orgánicos mediante la tecnología de la paca biodigestora: Una experiencia en la Universidad de Antioquia, Colombia²

Resumen

El presente trabajo considera una propuesta de un modelo para la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos basado en la experiencia generada a partir de la ejecución del proyecto Giro Sostenible UdeA, llevado a cabo desde el año 2019 en el Campus Principal de la Universidad de Antioquia ubicada en Medellín, Colombia, el cual responde a la necesidad de implementar métodos económicos, ecológicos y socialmente aceptados, maximizar el aprovechamiento, promover el cuidado de la salud pública y buenas prácticas ambientales desde la participación comunitaria y potenciar la investigación científica. A razón de los resultados exitosos y lo innovador de sus métodos, se considera la socialización de la experiencia como una forma de democratizar el conocimiento y apoyar la toma de decisiones en la planificación y gestión de los residuos orgánicos. GIRO Sostenible UdeA tuvo como objeto realizar la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos asociados al proceso de elaboración del café, producción de alimentos y mantenimiento de zonas verdes, mediante la aplicación de la tecnología de la paca biodigestora, para el tratamiento integral y aprovechamiento ecológico, articulando diferentes procesos de educación ambiental e investigación aplicada.

En el primer año de ejecución se logró la articulación de diferentes estamentos universitarios, establecer un modelo de tratamiento y aprovechamiento participativo, procesar en 80 pacas biodigestoras ensambladas 40 toneladas de residuos orgánicos, convertir el espacio de tratamiento en un laboratorio vivo, mediante la creación de un *Jardín para mariposas*, como una alternativa para la conservación y protección de los organismos polinizadores y un aula abierta para la aplicación de estrategias de educación ambiental dirigidas a estudiantes, docentes, administrativos, trabajadores y visitantes. Así mismo, el proyecto mediante la vinculación de estudiantes de pregrado de diferentes áreas del conocimiento se convirtió en objeto de investigación aplicada enfocada en el fortalecimiento continuo de los procesos de gestión.

² Artículo en extenso presentado como ponencia en el eje temático Ciudades y comunidades sostenibles. Coria, L., Blanes, J., & Aliaga, C. (2020). Acta del II Congreso virtual desarrollo sustentable y desafíos ambientales (Centro Bol). Retrieved from http://congresos.cebem.org/wp-content/uploads/2020/11/Acta_II_Congreso_Virtual-2020-1.pdf

Palabras clave: abono orgánico, aprovechamiento, gestión integral, pacas biodigestoras, residuos orgánicos.

4.1 Introducción

La gestión de los residuos es un problema permanente para los entes administrativos y las comunidades que perciben los efectos asociados al manejo inadecuado o la eliminación en vertederos a cielo abierto. En particular, los residuos orgánicos como restos de alimentos, material vegetal, excremento de animales, entre otros, provocan diversos impactos negativos en el medio ambiente y la salud pública debido a la generación de gases tóxicos, malos olores y proliferación de organismos patógenos (Keng et al., 2020). A pesar de la limitada disponibilidad de espacio en los vertederos y las dificultades para habilitar nuevos sitios de disposición final, la generación de residuos crece exponencialmente; en el mundo se producen cerca de 2.01 mil millones de toneladas de residuos municipales y, para 2050, se espera un total de 3.4 mil millones de toneladas aproximadamente si se continúa con la tendencia actual (Kaza et al., 2018) y no se modifican las dinámicas de vida, los niveles de consumo y las formas de producción.

Los residuos orgánicos lejos de ser un problema medioambiental son un recurso potencial que permite reincorporar los nutrientes en los ciclos biogeoquímicos mediante los procesos biológicos de la descomposición. La idea asimilada por los principios de la economía circular, como el reciclaje y la reutilización, representan alternativas apropiadas para emular las dinámicas de la naturaleza en la resolución de los problemas de origen antrópico. De acuerdo con Rana et al. (2020) la circularidad es el medio para alcanzar los objetivos de la sostenibilidad y una de las mejores formas de armonizar la relación del ser humano con la naturaleza. Por lo tanto, es necesario avanzar hacia la incorporación de métodos y tecnologías más eficientes y sostenibles en la gestión de los residuos orgánicos, que permitan soluciones prácticas en el tratamiento y aprovechamiento, a la vez que integran la participación comunitaria mediante estrategias de educación ambiental y potencian el mejoramiento permanente a través de la investigación aplicada.

Bajo esta perspectiva de aportar al mejoramiento de los procesos de reciclaje y reutilización de los residuos orgánicos y generar un referente para la ciudad y el país, en el 2019 se inició la primera

experiencia piloto de un programa para la Gestión Integral de los Residuos Orgánicos hacia la sostenibilidad (GIRO Sostenible) en el Campus Principal de la Universidad de Antioquia (UdeA), ubicada en Medellín, Colombia; el cual responde a la necesidad de implementar métodos económicos, ecológicos y socialmente aceptados, maximizar el aprovechamiento, promover el cuidado de la salud pública y buenas prácticas ambientales desde la participación comunitaria y el ejercicio de la investigación científica.

El proyecto GIRO Sostenible UdeA, pionero en Colombia, tuvo como objeto realizar la Gestión Integral de los residuos orgánicos asociados al proceso de utilización del café, producción de alimentos y mantenimiento de zonas verdes, mediante la aplicación de la tecnología de la Paca Biodigestora para su tratamiento integral y aprovechamiento ecológico, articulado a diferentes procesos de investigación y educación ambiental. Esta se desarrolló como un método complementario a los procesos que se llevan a cabo, los cuales no alcanzan a tratar la cantidad de residuos orgánicos que se generan actualmente en la UdeA, institución clasificada como un gran generador de residuos sólidos de la ciudad por el número de personas que la concurren, más de 40.000 entre estudiantes, profesores, trabajadores y visitantes, y la cantidad de residuos que genera, cerca de 553,8 toneladas de residuos orgánicos al año, de los cuales 102,6 toneladas son tratados mediante compostaje y los 451,2 toneladas restantes son enviadas al vertedero (relleno sanitario La Pradera), según el reporte entregado en el informe anual de medición verde de universidades del mundo – Green Metric World University Rankin- por la ingeniera Ana Mercedes Montoya, gestora ambiental de la División de infraestructura Física (Montoya, A.M, comunicación personal, febrero de 2020).

Para el caso específico de este proyecto, su ejecución se llevó a cabo gracias a la articulación de diferentes estamentos universitarios como la Facultad de Ingeniería, Bienestar Universitario y el área de Gestión Ambiental de la División de Infraestructura Física, los cuales aunaron esfuerzos para alcanzar los siguientes objetivos: fortalecer la gestión de los residuos orgánicos en la UdeA, minimizar la disposición final de los residuos orgánicos en el relleno sanitario, maximizar el aprovechamiento en la fuente de generación, aumentar los indicadores de gestión, fortalecer los procesos de participación comunitaria y responsabilidad ambiental institucional, involucrar a la comunidad en buenas prácticas ambientales desde la constitución de espacios y herramientas para

la sensibilización ecológica y la promoción del cuidado de la salud pública y la conservación de la calidad ambiental.

4.2 GIRO Sostenible

GIRO Sostenible se fundamenta en los principios de la economía circular, articula cuatro componentes operacionales: tratamiento integral, aprovechamiento ecológico, educación ambiental e investigación aplicada (gráfico 1). El tratamiento de los residuos orgánicos se realiza por medio de la tecnología de la paca biodigestora, un método que permite procesar todo tipo de material biodegradable. La descomposición en el sistema se da a través de un proceso de fermentación en estado sólido, mecanismo que permite convertir la materia orgánica en abono mediante la acción de una comunidad microbiana, sin causar impactos negativos en el ambiente. Para lograr fabricar la paca biodigestora se requiere realizar previamente la separación de los residuos en la fuente, establecer rutas de recolección selectiva, transporte hacia el sitio de ensamblaje y acondicionar un espacio para el almacenamiento temporal.

Gráfico 1.

Componentes operacionales del Programa GIRO Sostenible.



Nota. Fuente elaborado por los autores.

Durante el proceso de descomposición de los residuos orgánicos en pacas biodigestoras, el sistema puede ser aprovechado para el desarrollo de jardines funcionales o huertas agroecológicas por medio de la siembra de plantas ornamentales, aromáticas, medicinales y hortalizas, el mejoramiento de la biología de los suelos, la mitigación de los impactos del cambio climático y la participación comunitaria (Ossa, 2016). De acuerdo con información aportada por Velázquez et al. (2017), el abono obtenido de las pacas biodigestoras contiene nutrientes biodisponibles que pueden aprovechar las plantas para su crecimiento y desarrollo. Asimismo, el sustrato obtenido a los seis meses de descomposición cumple con los estándares fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos establecidos en la Norma Técnica Colombiana 5167 (2011), los cuales pueden contribuir a mejorar la calidad de los suelos (Ardila et al., 2015).

Las estrategias de educación ambiental se establecen como un eje transversal en el proceso de gestión, proporcionando espacios de participación comunitaria para la sensibilización e información sobre buenas prácticas ambientales y los principios de vida sostenibles. Con el modelo de GIRO Sostenible se integra a generadores, operarios y entes administrativos en las dinámicas de tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos, con el propósito de promover una transformación cultural y constituir los espacios de gestión en un laboratorio vivo, un aula abierta que proporciona el intercambio de saberes acerca de la biodiversidad, la cultura ambiental y alternativas de conservación y protección de los organismos polinizadores.

El componente de investigación aplicada tiene como propósito contribuir al mejoramiento continuo de los procesos de gestión integral de los residuos orgánicos en diferentes contextos. Con base en el mejoramiento continuo y la retroalimentación permanente, se vinculan métodos de investigación científica que conlleven a comprender las dinámicas de descomposición de los residuos en la paca biodigestora y la calidad de los productos obtenidos de acuerdo con las condiciones propias del entorno, para considerar la optimización de la descomposición y evaluar el impacto generado en la salud y el ambiente.

4.3 Caso GIRO Sostenible UdeA 2019-2020

El Campus Principal de la Universidad de Antioquia está ubicado en el municipio de Medellín, capital del departamento de Antioquia, Colombia. Según el Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge se encuentra en la región biogeografía bosque húmedo premontano (bh-PM), adjudicándole las características de un ecosistema apto para el desarrollo de biodiversidad faunística y florística y un espacio propicio para el asentamiento y tránsito de especies. El campus cuenta con un área total de 237.498 m², la cual está integrada por áreas con zonas construidas (156.594 m²) y áreas con zonas verdes (80.904 m²) (Ossa, 2016).

Este gran compendio universitario representa un servicio ecosistémico invaluable para el contexto urbano, en términos del bienestar humano y del sostenimiento de la biodiversidad. Además, de significar para quienes lo habitan el espacio propicio para crecer como personas, formarse como profesionales y construir en sociedad; condición que implica conservar, proteger y asegurar que futuras generaciones puedan aprovechar y disfrutar este espacio en las mismas condiciones como las generaciones presentes lo han logrado hacer. En consecuencia, ha sido una prioridad en el *Plan de Acción Institucional 2018-2021*, promulgar e incentivar acciones que permitan constituir un ecosistema universitario sostenible y ecológico que garantice el desarrollo de un ambiente saludable.

Con este propósito, desde el año 2004 se creó en el campus el centro de acopio de residuos, el cual incluye una planta de compostaje con dos biorreactores o celdas de cemento cubiertas para realizar el tratamiento de los residuos orgánicos en la fuente (PMIRS UdeA, 2005). A pesar de los esfuerzos en mejorar la gestión de los residuos, la cantidad de material producido diariamente supera la capacidad de carga de la planta de compostaje, lo que implica apilar o enviar al vertedero lo que no se alcanza a procesar. Entre los residuos orgánicos se encuentra la hojarasca y poda de jardines, los desechos de alimentos y la borra de café. Este último, es el residuo orgánico que queda en el filtro, tela o manga luego de colar la bebida en el momento de prepararla, especialmente cuando los granos de café han sido molidos. En el campus, por ejemplo, los expendios de alimentos son los principales generadores de borra de café, con una producción anual de 21 toneladas aproximadamente.

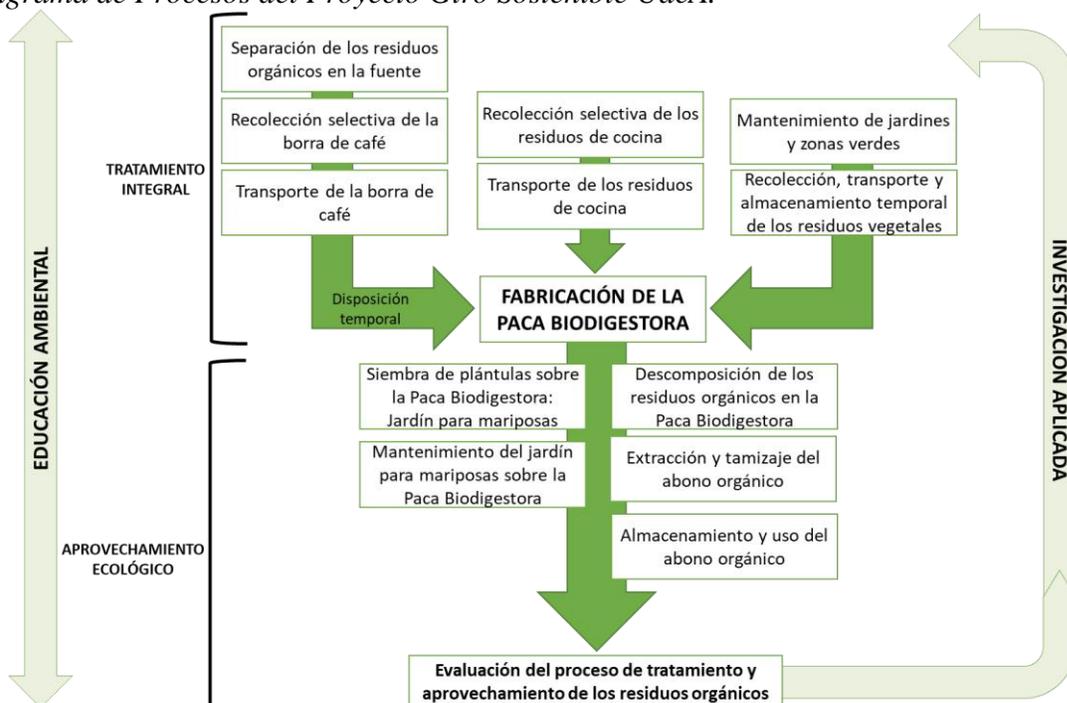
A razón de la necesidad de disminuir los residuos enviados al vertedero y aumentar los indicadores de tratamiento y aprovechamiento en la fuente, en el 2019 se inicia la experiencia piloto del programa GIRO Sostenible UdeA, como un proceso complementario al Plan de Gestión de Residuos Orgánicos en la institución. A continuación, se describe los componentes operacionales del proyecto GIRO Sostenible adaptado a las condiciones, dinámicas y características del campus universitario.

4.4 Componentes operacionales GIRO Sostenible UdeA

En la Universidad de Antioquia, GIRO Sostenible se lleva a cabo siguiendo una serie de actividades que permiten de manera periódica realizar el tratamiento y aprovechamiento de la borra de café, los residuos de cocina (frutas y verduras) y los residuos vegetales (hojarasca, poda y chamizos). Tal como se observa en el diagrama de procesos (Gráfico 2), se ha establecido una ruta secuencial para la gestión de los residuos orgánicos antes y después de la fabricación de la paca biodigestora.

Gráfico 2.

Diagrama de Procesos del Proyecto Giro Sostenible UdeA.



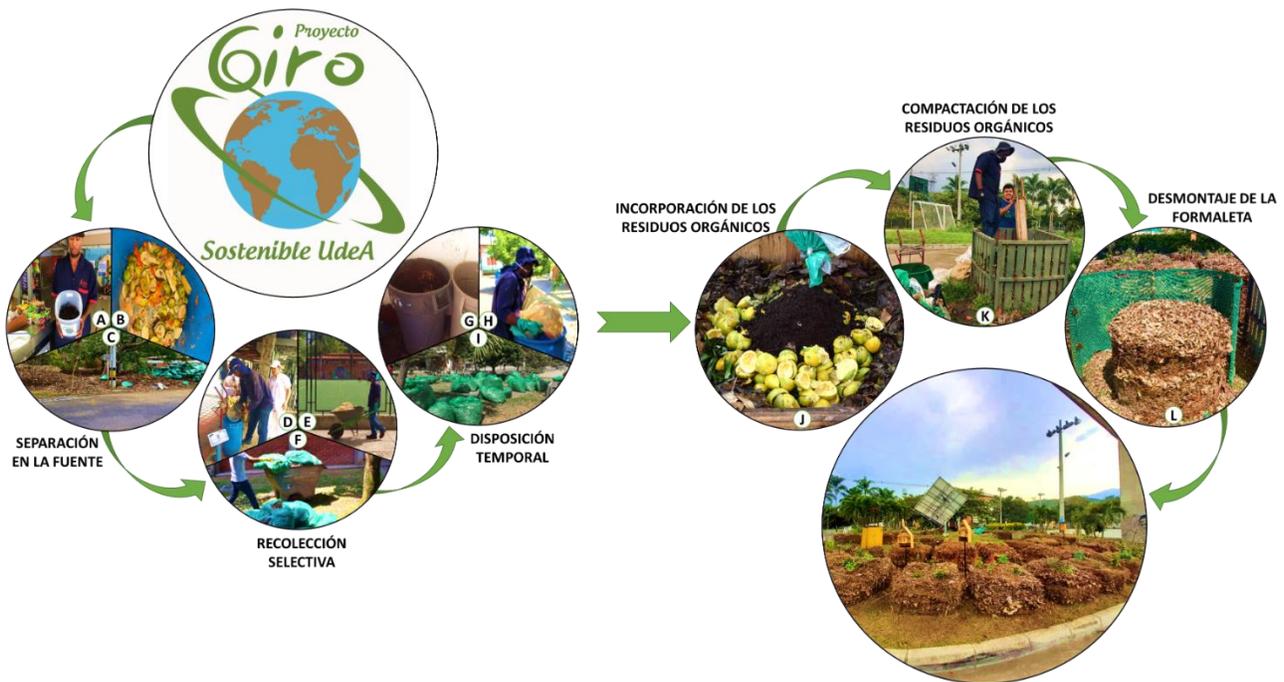
Nota. Fuente elaborado por los autores.

4.4.1 Tratamiento integral

El tratamiento de los residuos orgánicos en pacas biodigestoras se realiza mediante etapas (Gráfico 3), iniciando por los procesos de separación en la fuente, recolección selectiva y disposición temporal hasta el ensamblaje de la paca y su proceso de descomposición biológica.

Gráfico 3.

Proceso de tratamiento integral de los residuos orgánicos en GIRO Sostenible UdeA.



Nota. El proceso inicia con la separación en la fuente, la recolección selectiva y la disposición temporal de la borra de café (A-D-G), residuos de cocina (B-E-H) y residuos vegetales (C-F-I). Luego se realiza el proceso de ensamblaje de la paca biodigestora, primero se incorporan los residuos orgánicos (J), borra de café, residuos de cocina, y residuos vegetales, en una proporción 1:1:2, seguido se compactan (K) para eliminar la mayor cantidad de oxígeno y finalmente se desmonta la formaleta guía (L), para que se lleve a cabo la descomposición biológica. Fuente: Elaborado por los autores.

Separación de los residuos orgánicos en la fuente de generación:

Los residuos orgánicos que se generan en el campus universitario son separados en cada fuente de generación, los expendios de alimentos, por ejemplo, separan la borra de café en un recipiente plástico con tapa de capacidad de 5 litros (Gráfico 3-A) y los residuos de cocina, en canecas plásticas con bolsa (Gráfico 3-B.). Por otro lado, los residuos vegetales, son recolectados en las

zonas verdes, empacados en bolsas plásticas y posteriormente el personal encargado lo lleva al centro de acopio de los residuos ubicado en la esquina noroccidental del campus (Gráfico 3-C).

Rutas de recolección interna y transporte de los residuos orgánicos:

La recolección interna de los residuos orgánicos se realiza de manera selectiva, para el caso de la borra de café los operarios de aseo realizan dos rutas en el día para su recolección (Gráfico 3-D). Los residuos de cocina utilizados para la fabricación de las pacas biodigestoras, son recolectados por el personal encargado en los expendios de alimentos del mall de la Facultad de Ingeniería, unidad académica con la mayor cantidad de estudiantes, dos veces por semana, para ser transportados hasta el lugar de ensamblaje de las pacas (Gráfico 3-E). En el caso de los residuos vegetales, el personal encargado hace rutas de recolección en la mañana y en la tarde, los cuales trasladan hasta el centro de acopio (Gráfico 3-F). De los residuos vegetales almacenados, una fracción es transportada hasta la zona de las pacas biodigestoras para, posteriormente, ser incorporada en los sistemas de tratamiento.

Almacenamiento temporal:

El almacenamiento temporal de los residuos orgánicos se hace de manera separada, por un lado, la borra de café es almacenada en canecas plásticas de 121 litros (Gráfico 3-G) dispuestas en la bodega del café, la cual está ubicada en la zona de pacas biodigestoras. Los residuos de cocina se almacenan diariamente en canecas plásticas de 55 galones, las cuales se encuentran contiguas a los expendios de alimentos (Gráfico 3-H.) Para el caso de los residuos vegetales, su almacenamiento se realiza en el centro de acopio de los residuos de la institución, la fracción que se incorpora en las pacas biodigestoras es almacenada cerca al jardín para mariposas (Gráfico 3-I), creado como estrategia de aprovechamiento y del cual se hablará más adelante.

Ensamblaje de las pacas biodigestoras:

Las pacas biodigestoras son ensambladas dos veces por semana; para su fabricación el operario usa una formaleta de madera plástica o una maquina compactadora manual e incorpora en ella, alrededor de 500 Kg de residuos orgánicos, distribuidos en 125 Kg de borra de café y 125 Kg de residuos de cocina, los cuales se ubican en el centro y se cubren con 300 Kg de residuos vegetales, aproximadamente. La paca se va ensamblando por capas y después de cada capa se realiza el

proceso de compactación del material para eliminar la mayor cantidad de oxígeno presente, una vez se alcanza la altura de 1 m se retira la formaleta y se da inicio al proceso de descomposición de los residuos. En el Gráfico 3-J, K y L, se muestra en detalle el proceso llevado a cabo para la fabricación de las pacas biodigestoras.

4.4.2 Aprovechamiento ecológico

El aprovechamiento ecológico de los residuos orgánicos en pacas biodigestoras puede realizarse durante y después de la transformación del material (Gráfico 4); esto constituye una de las bondades del sistema ya que no sólo permite realizar el tratamiento adecuado, protegiendo la salud pública y ambiental, sino también fortalecer los procesos de autonomía y soberanía alimentaria de las comunidades, incentivar estrategias de conservación y protección de los organismos polinizadores y generar dinámicas de trabajo digno.

Gráfico 4.

Proceso de aprovechamiento de los residuos orgánicos en GIRO Sostenible UdeA.



Nota. Fuente elaborado por los autores.

Descomposición de los residuos orgánicos en pacas biodigestoras:

La paca biodigestora se considera un proceso autónomo de descomposición de los residuos orgánicos, debido a que no requiere arduas jornadas de monitoreo ni volteo de los materiales incorporados. No obstante, se ha considerado el monitoreo del proceso de transformación de los residuos hasta abono orgánico por medio de la medición semanal de los parámetros fisicoquímicos: temperatura, pH, humedad y altura, durante los seis meses siguientes luego del ensamblaje. Las actividades de monitoreo se realizan con equipos de medición directa con sonda metálica, la cual se introduce en el centro de la paca para determinar en tiempo real los valores de las variables en cada sistema. Normalmente, se espera encontrar en las pacas biodigestoras en los primeros 15 días de descomposición valores máximos de temperatura entre los 55-60 °C, valores mínimos de pH de 3.5-4.5 unidades de pH, oscilaciones de la humedad entre 50-75% (húmedo) y 75-100% (muy húmedo). A los 6 meses de descomposición, en la fase de estabilización y madurez del material, la temperatura alcanza valores cercanos a la temperatura ambiente, el pH oscila en un rango de neutralidad (6.5-7.5 unidades de pH), los valores de humedad responden a la temporada climática (época de lluvia o época de sequía) y la altura alcanza valores menores a los 40 cm.

Un jardín para mariposas sobre pacas biodigestoras:

Como estrategia de aprovechamiento de las pacas biodigestoras, durante el proceso de descomposición de los residuos orgánicos, se ha realizado la construcción de un jardín para mariposas mediante la siembra de plantas hospederas, atrayentes y nectaríferas (Gráfico 4-A). Las actividades de cuidado y mantenimiento del jardín incluyen el riego periódico, la siembra y trasplante de plántulas, previo a la actividad de desmontaje del sistema para la obtención del abono orgánico. Finalmente, se realiza un proceso de abonado utilizando el mismo material resultante de las pacas biodigestoras (Gráfico 4-B).

Obtención de abono orgánico:

La extracción del abono orgánico generado en la paca biodigestora se lleva a cabo dos veces por semana y posterior a los 6 meses de descomposición (Gráfico 4-E). Para ello, se utiliza una zaranda portátil para su tamizaje (Gráfico 4-D); el abono pasa a través de un canal y es empacado en costales, el material se almacena temporalmente en la bodega del café y luego se entrega a los

jardineros, quienes realizan su incorporación en los suelos o zonas verdes de la Universidad (Gráfico 3-C).

4.4.3 Estrategias de educación ambiental

GIRO Sostenible UdeA, basado en la propuesta de aula abierta y laboratorio vivo desarrolla en el jardín para mariposas, un espacio de participación y educación ambiental donde es posible generar estrategias didácticas y pedagógicas para socializar, capacitar, sensibilizar y difundir el proyecto con diferentes actores estratégicos como: operarios y personal de aseo, guías verdes y culturales, personal de las cafeterías, estudiantes, docentes, trabajadores y visitantes. La educación ambiental, como eje transversal del proyecto GIRO Sostenible UdeA, se desarrolla con diferentes propósitos como: i) socializar la contribución de la paca biodigestora en el manejo integral de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia y en las funciones biológicas como la polinización; ii) capacitar y sensibilizar acerca del manejo integral de los residuos orgánicos mediante esta tecnología y divulgar buenas prácticas ambientales, desde la separación en la fuente hasta el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante la construcción de huertas orgánicas y jardines funcionales; en el Gráfico 5 es posible observar algunos participantes de los encuentros formativos llevados a cabo durante la ejecución del proyecto, en total se logró la capacitación de más de 300 personas en diferentes espacios de educación ambiental.

Gráfico 5.

Registros fotográficos de los encuentros formativos realizados en el marco del proyecto GIRO Sostenible UdeA



Personal administrativo y docentes del Ceset y el LabGiga.



Organizaciones gubernamentales y comunitarias: Parques Nacionales, Jardín Botánico, Metro parques, gestores ambientales de Bello y Guillermo Silva, gestor de la paca biodigestora.



Grupo adultos mayores de deporte y Salud UdeA.



Niños y jóvenes inscritos en las vacaciones recreativas de la UdeA.



Estudiantes de derecho del curso *Vivamos la UdeA*.



Personal de la División de Infraestructura Física, Bienestar Universitario y Guías Verdes de la UdeA.

4.4.4 Investigación aplicada

El proyecto GIRO Sostenible UdeA logró, mediante la vinculación de estudiantes de pregrado de diferentes áreas del conocimiento, el desarrollo de cuatro trabajos de investigación, i) Evaluación de la cinética química de descomposición de la materia orgánica en el proceso de digestión de residuos de cocina con borra de café, empleando la biotecnología de pacas biodigestoras; ii) Análisis de los parámetros fisicoquímicos en el proceso de digestión de borra de café con residuos de alimentos mediante pacas biodigestoras; iii) Evaluación de los macro invertebrados asociados al proceso de digestión de la borra de café con residuos de cocina en pacas biodigestoras y iv) Caracterización de los microorganismos en pacas biodigestoras durante la transformación de la borra de café y residuos de alimento; con el fin de afianzar la investigación aplicada enfocada en comprender los procesos de tratamiento y aprovechamiento en la gestión integral de los residuos orgánicos permitiendo generar conocimiento del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo y, por ende, información de base para su optimización.

4.5 Conclusiones

Durante el primer año de ejecución del proyecto GIRO Sostenible UdeA se logró la articulación de diferentes estamentos universitarios, establecer un modelo de tratamiento y aprovechamiento participativo, procesar en 80 pacas biodigestoras ensambladas 40 toneladas de residuos orgánicos, convertir el espacio de tratamiento en un laboratorio vivo mediante la creación de un *jardín para mariposas*, conservar y proteger los organismos polinizadores y crear un aula abierta para la

aplicación de estrategias de educación ambiental dirigidas a la comunidad académica (Gráfico 6). En la misma línea, el proyecto mediante la vinculación de estudiantes de pregrado de diferentes áreas del conocimiento se convirtió en objeto de investigación aplicada enfocada en el fortalecimiento continuo de los procesos de gestión.

Los resultados satisfactorios de GIRO Sostenible UdeA demuestran la factibilidad para ser replicado en diferentes contextos y escalado a todo tipo de generadores de residuos orgánicos. De igual manera, las pacas biodigestoras representan un método ecológico y sostenible que promueve el cuidado de los recursos naturales y la salud pública, así como una estrategia para mitigar los impactos del cambio climático desde la responsabilidad socioambiental participativa e incluyente.

Gráfico 6.

Jardín para mariposas sobre residuos orgánicos del Proyecto GIRO Sostenible UdeA



4.6 Referencias

- 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(2), 38–55. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1428/1/896-2554-1-PB.pdf>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050* (© World Ba). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Keng, Z. X., Chong, S., Ng, C. G., Ridzuan, N. I., Hanson, S., Pan, G.-T., ... Lam, H. L. (2020). Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121220>
- Norma Técnica Colombiana 5167. (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Bogotá.
- 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*. Universidad de Antioquia.
- Plan de Acción Institucional 2018-2021*. (2019). Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Retrieved from https://appvicedoce.udea.edu.co/concursoprofesoral/files/planes/PAI_2018_2021.pdf
- PMIRS UdeA. (2005). *Decreto 526: Plan de Manejo Integral de los Residuos Sólidos*. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Rana, S., Mishra, P., Gupta, R., ab bin Wahid, Z., & Singh, L. (2020). Circular economy: transforming solid-wastes to useful products. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Sustainable Bioresources for the Emerging Bioeconomy* (pp. 223–240). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64309-4.00010-6>
- Velázquez Cigarroa, E., Ossa Carrasquilla, L. C., Jarquín Sanchez, N., & Victorino Ramírez, L. (2017). Biodigester bales: method for the ecological management of organic residues. *AGROFOR International Journal*, 2(3). <https://doi.org/10.7251/AGRENG1703108C>