

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

Laura Catalina Ossa-Carrasquilla²
Mauricio Andrés Correa-Ochoa³ Luisa María Múnera-Porras⁴

RESUMEN

Introducción. La Paca Biodigestora, también conocida como Paca Digestora Silva, es una tecnología para la gestión integral de los residuos orgánicos, un proceso que permite la degradación biológica de la materia orgánica hasta abono, un material orgánico que contiene nutrientes biodisponibles para las plantas y organismos que benefician la calidad del suelo. **Objetivo.** Identificar y analizar la producción científica e investigaciones desarrolladas sobre las Pacas Biodigestoras. **Materiales y métodos.** Se aplicó el método Proknow-C que

consiste en seleccionar un portafolio bibliográfico y desarrollar en él un análisis bibliométrico y sistémico, por medio del rastreo en bases de datos y repositorios institucionales. **Resultados.** Fueron identificados 12 artículos que conformaron el portafolio bibliográfico de investigaciones que se han desarrollado sobre las pacas biodigestoras. En el periodo entre 2015 y 2017 fue encontrada la mayor cantidad de publicaciones, tres por año. La revista más destaca es Producción + Limpia. Los diferentes autores han enfocado sus investigaciones

¹ Artículo original derivado de la investigación: Dinámica de descomposición de los residuos de frutas, borra de café y hojarasca mediante la tecnología de Pacas Biodigestoras, realizada entre junio de 2019 y marzo de 2020, financiado por la Universidad de Antioquia – Medellín–Colombia.

² Ingeniera Ambiental, candidata a Magíster en Gestión Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia. Docente de cátedra de la Universidad de Antioquia, Colombia. Correo: laurac.ossa@udea.edu.co / ORCID ID: 0000-0001-8058-8892

³ Doctor en Ingeniería, Magíster en Ingeniería Ambiental, Ingeniero Sanitario y Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia. Docente titular de la Universidad de Antioquia, Colombia. Correo: mandres.correa@udea.edu.co / ORCID ID: 0000-0003-3666-0767

⁴ Magíster en Biología. Microbióloga Industrial y Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia. Docente titular de la Universidad de Antioquia, Colombia. Correo: luisam.munera@udea.edu.co / ORCID ID: 0000-0002-0215-9993

Autor para correspondencia: Laura Catalina Ossa Carrasquilla, correo: laurac.ossa@udea.edu.co

Recibido: 22/08/2020 **Aceptado:** 30/11/2020

en analizar la variación de los parámetros fisicoquímicos, estudiar el proceso de descomposición de residuos orgánicos en las pacas biodigestoras y evaluar la calidad del producto final, sus características fisicoquímicas, microbiológicas y nutricionales. **Conclusiones.** Pese a que la información científica sobre el método es incipiente, lo cual limita su comprensión y aplicación, varios autores coinciden que la Paca Biodigestora es un

método viable para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos, debido a que evita los impactos negativos en el ambiente, protege la salud pública y fomenta las prácticas ambientales sostenibles desde la participación comunitaria.

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

The biodigester bale as an organic waste treatment strategy: a bibliographic review

ABSTRACT

Introduction. The Biodigester Bale, also known as Silva Digester Bale, is a technology for the integrated management of organic waste, a process that allows the biological degradation of organic matter into fertilizer, an organic material containing bioavailable nutrients for plants and organisms that benefit soil quality. **Objective.** To identify and analyze the scientific production and research developed on the Biodigester Bales. **Materials and Methods.** The Proknow-C method was applied, which consists of selecting a bibliographic portfolio and developing a bibliometric and systemic analysis on it, by means of tracking in databases and institutional repositories. **Results.** Twelve articles were identified that made up the bibliographic portfolio of research that has been developed on biodigester bales. In the period between 2015 and 2017 the largest number of publications was found, three per year. The most

outstanding journal is Producción + Limpia. The different authors have focused their research on analyzing the variation of physicochemical parameters, studying the process of decomposition of organic waste in biodigester bales and evaluating the quality of the final product, its physicochemical, microbiological and nutritional characteristics. **Conclusions.** Although the scientific information on the method is incipient, which limits its understanding and application. Several authors agree that the Biodigester Bale is a viable method for the treatment and use of organic waste, because it avoids negative impacts on the environment, protects public health and promotes sustainable environmental practices from community participation. **Keywords:** biodigester bale, integral management, organic fertilizer, organic waste, Proknow-C.

O fardo biodigestor como estratégia de tratamento de resíduos orgânicos: Uma revisão bibliográfica

RESUMO

Introdução. O fardo biodigestor, também conhecida como fardos digestores Silva são uma tecnologia para a gestão integral de resíduos orgânicos, um processo que permite a degradação biológica da matéria orgânica até obter o adubo; um material orgânico que contém nutrientes biologicamente disponibilizados para as plantas e organismos e traz um benefício para o solo e melhora sua qualidade. **Objetivo.** Identificar e analisar a produção científica e pesquisas desenvolvidas sobre os fardos biodigestores. **Metodologia.** Foi utilizado o método Proknow-C que envolve a seleção de um portfólio bibliográfico e desenvolvimento de uma análise bibliométrica e sistêmica, através da busca em bases de dados e repositórios institucionais. **Resultados.** Foram identificados 12 artigos que constituíram o portfólio bibliográfico de pesquisas que têm sido desenvolvidas sobre os fardos biodigestores. No período entre 2015 e 2017, foi encontrada a maior quantidade de publicações, três por ano. A revista mais destacada na

revisão é *Producción + Limpia*. Os diferentes autores têm focalizado suas investigações em analisar a variação dos parâmetros físico-químicos, estudar o processo de decomposição dos resíduos orgânicos nos fardos biodigestores e avaliar a qualidade do produto final, suas características físico-químicas, microbiológicas e nutricionais. **Conclusões.** Apesar de a informação científica sobre o método é ainda insuficiente, por isso se limita a sua compreensão e aplicação. Vários autores coincidem que o fardo biodigestor é um método viável para o tratamento e aproveitamento dos resíduos orgânicos, devido a que evita os impactos negativos no meio ambiente, protege a saúde pública e fomenta as práticas ambientais sustentáveis desde a participação comunitária.

Palavras chave: adubo orgânico, fardo biodigestor, gestão integral, Proknow-C, resíduos orgânicos.

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 Figura

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 Figura 1-A1 y A2), sin provocar condiciones anaeróbicas estrictas, ya que el proceso de descomposición se lleva a cabo a la intemperie (ver Figura 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 Figura 1-B1) y

después del proceso de descomposición de los RO (ver Figura 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.



Figura 1. Proceso de fabricación de la Paca Biodigestora (A) y estrategias de aprovechamiento de los residuos orgánicos (B). Fuente: elaborado por los autores

MATERIALES Y MÉTODOS

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 Figura 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.

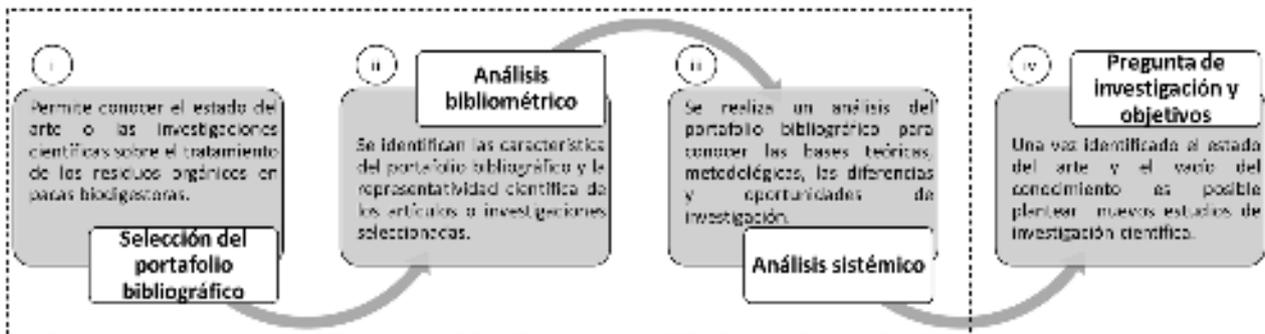


Figura 2. Etapas del Proceso de Desarrollo del Conocimiento-Constructivista (Proknow-C)
Fuente: adaptado y traducido de (Ensslin et al., 2014; Mauro et al., 2018)

Para lograr el objetivo de esta investigación, se siguieron los procedimientos de las etapas uno a la 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 Figura 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.



Figura 3. Proceso de selección del portafolio bibliográfico

Fuente: 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 Figura 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.

RESULTADOS

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
Biodigestor 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	Pulgarin 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

Fuente: elaborada 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 Figura 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.



Figura 4. Distribución de la cantidad de publicaciones por año y las revistas o repositorios donde se ha publicado sobre las pacas biodigestoras.

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 Figura 5.



Figura 5. Número de publicaciones en revistas o repositorios realizadas por cada autor.

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
Bioteología	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 (hojarasca)	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		

Fuente: elaborada por los autores

En la tabla 1, el análisis sistémico del portafolio bibliográfico 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, cascaras, 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.

DISCUSIÓN

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 legumbreras 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

le 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 al 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.

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.

REFERENCIAS

- Ardila Delgado, Jayme Liset, & Cano Córdoba, J. (2011). Técnica de descomposición de residuos forestales y heces de establo con pacas digestoras : aspectos físico-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 físicoquímicos, 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&luid=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.

- 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>
- 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. (2016a). Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia. Universidad de Antioquia.
- Ossa Carrasquilla, L. C. (2016b). Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia. 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&luid=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&luid=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>