

Tendencias y alternativas para la gestión de residuos sólidos orgánicos en unidades militares del Ejército Nacional de Colombia¹

<https://doi.org/10.21830/9789585318342.07>

7

Natalia Rojas Prieto²
Yudtanduly Acuña Monsalve³
Andrés Ramírez-Duque⁴
Universidad El Bosque

Resumen

La gestión y tratamiento de residuos orgánicos consiste en la implementación de mecanismos factibles para su aprovechamiento energético y agrícola. Actualmente, se han identificado diferentes tendencias para implementación de métodos alternativos caracterizados por ser tecnologías seguras, eficaces y respetuosas con el medioambiente, entre las que se destacan los biodigestores, de los que se obtiene biogás y bioles con potencial fertilizante líquido, la generación de enmiendas orgánicas del suelo, como lo es el compostaje y la generación de biofertilizantes que pueden suplir el uso de fertilizantes de síntesis. Los residuos provenientes de actividades agrícolas suelen incinerarse o disponerse en vertederos, lo que conlleva la liberación de gases de efecto invernadero, aportando al deterioro del ambiente e incrementando el calentamiento global; además, estos residuos pueden contener organismos patógenos como coliformes, endoparásitos, ectoparásitos y vectores de microorganismos que pueden representar un peligro

1 Este capítulo es el resultado del trabajo en conjunto del programa de bioingeniería y la RedBioLAC para incentivar el aprovechamiento de los residuos orgánicos como eje transversal, para apoyar procesos sostenibles de pequeños productores agropecuarios en Colombia. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

2 Estudiante de la Maestría en Biotecnología y Microbióloga Agrícola y Veterinaria (Universidad Javeriana). Profesora del programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque. Experiencia en biotecnología aplicada al ámbito agrícola y ambiental, y al tratamiento de residuos sólidos aprovechables orgánicos. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-94856293> - Contacto: rojasnatalia@unbosque.edu.co

3 Magister en Diseño y Gestión de Procesos e Ingeniería de Producción Biotecnológica (Universidad de La Sabana). Profesora del programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque. Experiencia en el diseño y desarrollo de temas relacionados con biocombustibles, procesos agroindustriales y bioprocesos. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-70875246> - Contacto: yacunam@unbosque.edu.co

4 PhD en Ingeniería Eléctrica (Universidade Federal do Espírito Santo). Magíster en Automatización Industrial e Ingeniero Mecatrónico (Universidad Nacional de Colombia). Profesor investigador del programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8419-9285> - Contacto: aaramirez@unbosque.edu.co

para la salud de animales y humanos. En este orden de ideas, la transformación de los residuos orgánicos como una alternativa para la generación de energía o fertilizantes orgánicos es una tendencia multidisciplinar de la biotecnología, en donde confluyen también técnicas asociadas a la ingeniería de control y automatización para optimizar los procesos. El uso de metodologías de control automático busca maximizar, por ejemplo, la recuperación, mediada por microorganismos, de elementos valiosos presentes en los residuos necesarios para el desarrollo vegetal, a través del control de variables como la temperatura, el pH y la humedad.

Palabras clave: biogás; digestión anaerobia; energía de la biomasa; enmiendas orgánicas; recuperación calorífica; residuos sólidos orgánicos.

Introducción

Los residuos son materiales desechados tras haber cumplido la función para la que fueron creados. Estos aportan de forma representativa a la contaminación ambiental, puesto que alteran, anulando o disminuyendo, la función del sistema en el que son introducidos (Henao & Zapata, 2008).

Los residuos sólidos se denominan así debido al estado de la materia en que se presentan; de acuerdo con su manejo pueden ser aprovechables, cuando se considera que pueden ser reutilizados o transformados en otro producto, o no aprovechables. A su vez, los residuos sólidos urbanos (RSU) corresponden a los desechos de origen doméstico, entre los que se incluyen los de tipo residencial, comercial, industrial, mineros y hospitalarios, que pueden ser de tóxicos, radiactivos o inertes. Finalmente, los RSU orgánicos (figura 1) son residuos derivados de organismos vivos, por lo que en su mayoría son biodegradables, lo que significa que se transforman en otro tipo de materia orgánica. Dentro de estos últimos se encuentran los residuos de alimentos, el estiércol, los restos vegetales, el papel y el cartón (Henao & Zapata, 2008; Castiblanco & Rodríguez, 2017; Gómez-Soto et al., 2019).

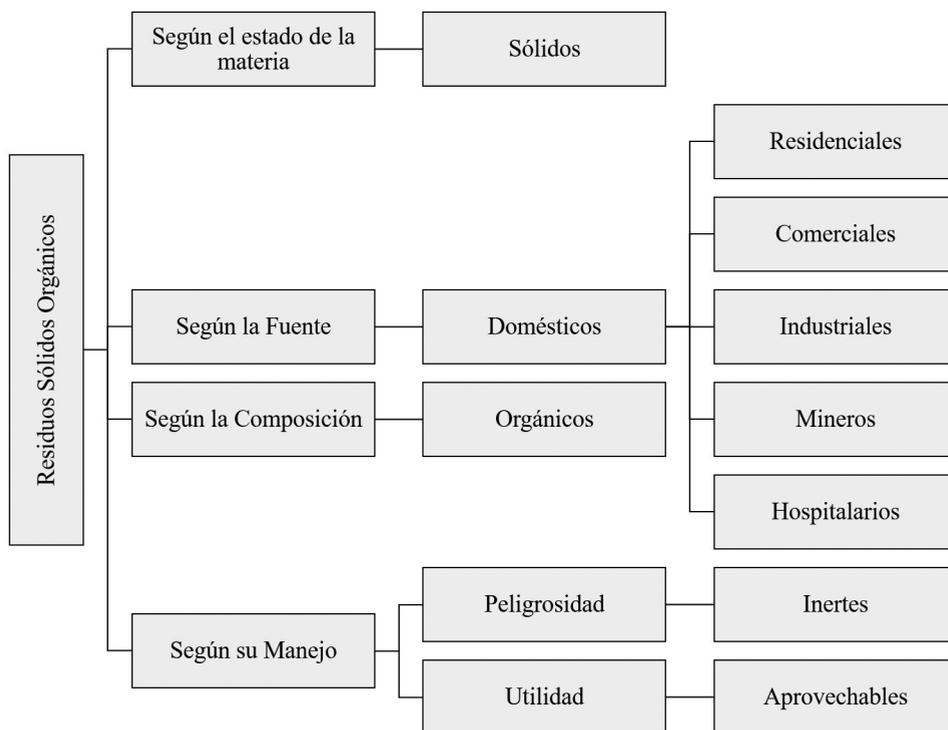


Figura 1. Clasificación de los residuos sólidos urbanos orgánicos

Marco teórico

El modelo de la gestión integral de residuos sólidos

La gestión integral de residuos sólidos (GIRS) es una estrategia para la gestión de residuos, que se proyecta mundialmente en términos de políticas a cumplir, como “la vía económica, técnica, socialmente aceptable y sustentable para minimizar los impactos antiestéticos, a la salud y al ambiente generados por los residuos sólidos urbanos” (Jiménez, 2017, p. 174).

En esta se incluyen las funciones administrativas, financieras, legales, de planificación y operativas, de los residuos sólidos, a la vez que establece el manejo de residuos, lo que hace referencia a las actividades relacionadas con el ciclo de vida del residuo, como la generación, separación en la fuente, recolección, transferencia y transporte, aprovechamiento, tratamiento y su disposición final de los residuos sólidos (Haghi, 2010; CONPES, 2016).

La GIRS define una jerarquía de los residuos para su gestión, donde predomina la reducción de la generación de residuos al máximo, seguido del reuso o reciclaje de los materiales que componen los desechos, y finalmente, como última opción, la disposición en rellenos sanitarios (CONPES, 2016; Jiménez, 2017).

La gestión adecuada de los residuos permite, entre otros beneficios, estimar el potencial de recuperación de las materias primas, determinar tanto la fuente de generación como las propiedades químicas, físicas y térmicas de los residuos, y orientar el diseño de equipos y procesos de tratamiento y aprovechamiento de aquellos (Haghi, 2010).

Para poder cumplir con lo anterior, la GIRS requiere de la intervención de la ingeniería por medio de procesos tecnificados, lo que puede convertirla en una propuesta costosa y poco viable. Por lo que es ideal generar procesos tecnificados adecuados bajo una inversión llamativa y accesible, lo que se ha demostrado que se puede lograr utilizando los principios de degradación biológica, como una alternativa económica y ecológica para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos y otros (Sarkar & Singh, 2015; Jiménez, 2017).

Gestión de desechos sólidos orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos deben gestionarse para evitar el agotamiento de los recursos naturales, minimizar el riesgo para la salud humana y animal, y reducir la contaminación ambiental (Collins, 2017).

En el caso de los países en desarrollo, la contaminación generalizada por desechos orgánicos se debe a su mala administración, la cual, a su vez, es consecuencia de diferentes falencias, como deficiencias técnicas y presupuestales, y la falta de infraestructura adecuada para la gestión de estos residuos, lo que, sumado al incremento de la generación de residuos, conduce a alteraciones en la salud pública y el ambiente (Sarkar & Singh, 2015).

Disposición y problema con los desechos

La disposición final de los residuos sólidos orgánicos en rellenos sanitarios implica grandes problemáticas, como el agotamiento de la vida útil de los rellenos de forma acelerada y la generación de gases y lixiviados que contienen gran carga de agentes contaminantes que deterioran la calidad del agua, el aire y el suelo (Henao & Zapata, 2008; Superservicios, DNP y Presidencia de la República, 2019).

De otra parte, al ser producto de la actividad antropogénica, el volumen y concentración de los residuos incrementa cada año en función de las características de consumo de la humanidad; además, en su composición tiende a prevalecer, e

incluso incrementarse, el uso de sustancias xenobióticas, lo que dificulta su gestión y tratamiento, generando grandes impactos negativos en los ecosistemas (Gazzo & Librandi, s. f; Sarkar & Singh, 2015).

Aprovechamiento y tratamiento de los desechos

Los residuos son aprovechables si pueden ser reutilizados o transformados en un nuevo producto que tenga valor comercial, lo que debe estar definido por las autoridades ambientales en los Planes de Gestión Integral de Residuos (Henao & Zapata, 2008).

El aprovechamiento puede ocurrir de manera directa o indirecta, como resultado de procesos de tratamiento, reutilización, reciclaje, generación de biogás, compostaje, bioabonos, incineración con producción de energía, entre otros. Estos procesos de aprovechamiento deben ser económicamente viables, factibles en su desarrollo, y generar un impacto negativo mínimo en el ambiente (Henao & Zapata, 2008).

El aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos orgánicos lleva a la disminución de impactos ambientales y sociales originados tras la gestión de residuos, lo que contribuye a disminuir la demanda de recursos naturales, el consumo de energía y los costos de operación y mantenimiento de los lugares de disposición final, a lo que suma el incremento de su ciclo de vida (Sarkar & Singh, 2015).

A su vez, estos residuos están compuestos por proteínas, lípidos, carbohidratos y otras moléculas que se pueden recuperar o transformar por medio de procesos biológicos, aportando al flujo de nutrientes y energía en el ecosistema, y convirtiéndose en productos aprovechables en nuevos procesos (Gómez et al., 2019).

De acuerdo con lo anterior, el presente capítulo se enfoca en tres técnicas viables para el aprovechamiento y el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos, con miras a fortalecer la gestión integral de estos residuos y a la obtención de beneficios de estos procesos, los cuales pueden ser aprovechados en áreas rurales y en actividades basadas en economía campesina.

La producción de biogás, el proceso de compostaje y el uso de los residuos orgánicos para la generación de biofertilizantes y acondicionadores de suelos, entre otras actividades, son técnicas mediante las cuales se pueden aprovechar y tratar los residuos sólidos orgánicos.

Técnicas asociadas al aprovechamiento y tratamiento de residuos

Implementar técnicas para la reducción y aprovechamiento de los residuos sólidos implica disminuir la demanda de recursos naturales y los costos de manutención de los sitios de disposición final de tales residuos, además, permite reducir la contaminación ambiental y riesgos a la salud humana y animal (Henao & Zapata, 2008).

La biomasa residual corresponde a residuos orgánicos aprovechables; esta puede ser aprovechada o tratada mediante transformaciones mediadas por técnicas que consisten en procesos termoquímicos, físicos, químicos o biológicos, obteniéndose productos de valor (Gómez et al., 2019).

Dentro de los procesos de aprovechamiento y transformación de los residuos sólidos, se pueden mencionar (Tarigo et al., 2004; Henao & Zapata, 2008; Galindo et al., 2007):

1. La alimentación animal: en esta se utilizan los residuos sin ningún tipo de transformación, suele usarse principalmente para alimentar al ganado bovino y porcino. Se debe tener en cuenta que este tipo de residuos son propensos a la descomposición, por lo que se deben establecer estrategias adecuadas para su almacenamiento. También, se han desarrollado investigaciones en torno a la posibilidad del uso de heces animales para alimentación de otros animales.
2. Biocombustibles: la generación de estos se da a partir de diversos residuos orgánicos que atraviesan por diferentes procesos de fermentación, entre estos se comprenden:
 - Bioetanol: alcohol carburante que resulta de un proceso de fermentación de caña de azúcar o remolacha, seguido de una destilación.
 - Biodiésel: combustible para motores tipo diésel que se genera a partir de un proceso de transesterificación que utiliza aceite vegetal o grasa animal y metanol o etanol.
 - Metano: proceso de fermentación anaerobia de la materia orgánica, de la que se obtiene biogás, compuesto por CO_2 (30%) y CH_4 (70%).
6. Abonos y enmiendas orgánicas: los dos corresponden a productos generados a partir de la transformación de residuos orgánicos. Los primeros hacen referencia a productos que aportan nutrientes a las plantas; los segundos son productos que buscan incrementar el contenido de materia orgánica del suelo, promoviendo al mejoramiento de sus propiedades fisicoquímicas y biológicas.

En el siguiente apartado se profundizará en el conocimiento acerca del aprovechamiento de estos residuos a través de la generación de biogás, compost y e biofertilizantes líquidos.

Generación de biogás

La digestión anaerobia (DA) es una alternativa sostenible para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU, porque produce energía renovable y recicla nutrientes (Luste & Luostarinen, 2010). En Colombia el 60% de los RSU son materia orgánica (residuos de comida preparada, como no preparada), caracterizada por un alto contenido de humedad y compuestos orgánicos biodegradables (Departamento Nacional de Planeación, 2019). Europa ha sido pionera en la DA de RSU, para el año 2010 había más de 200 plantas en funcionamiento, las cuales han sido impulsadas por políticas públicas enfocadas en planes subsidiados. Sin embargo, debido al deseo de maximizar la producción de biogás y energía, estas plantas de tratamiento se caracterizan por altos costos de implementación y operación, ya que la mayoría de ellas incluyen sistemas de pretratamiento, calentamiento y mezcla. El enfoque tecnológico europeo de la DA para los RSU ha demostrado una alta eficiencia, pero también una considerable dependencia de los subsidios económicos para ser rentable. Estas soluciones son sofisticadas y costosas, por lo tanto, no son favorables para su implementación en los países en desarrollo (Martí-Herrero et al., 2019).

Los sistemas de DA, mediante los cuales se puede obtener biogás, conforman una tecnología apropiada y de gran impacto en la vida diaria de pequeños agricultores y sus familias. Entre los principales beneficios cabe destacar el uso de biogás como combustible para cocinar, en lugar de biomasa sólida (leña, carbón vegetal, residuos de cosecha o estiércol seco), lo que genera un ambiente libre de emisiones y, por ende, un impacto positivo en la salud de los usuarios.

En este contexto, los sistemas de producción de biogás de bajo costo son alternativas para la reducción del impacto ambiental y la mejora en la calidad de vida de las familias rurales. Los biodigestores de bajo costo se consideran una tecnología limpia y respetuosa con el medioambiente, que puede ayudar a los pequeños agricultores a tratar los desechos del ganado y RSU de una manera sostenible, mientras producen un biofertilizante (digestato) y al tiempo satisfacen sus necesidades energéticas (Garfí et al., 2019).

Existen diversas iniciativas para biodigestores de bajo costo, explorando adaptaciones tecnológicas, en la implementación y operación de los sistemas. En países como Perú, China, India, Vietnam y Etiopía, se han realizado estudios en los que se evaluaron los beneficios ambientales, demostrando que los biodigestores generan beneficios ambientales al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la contaminación del suelo y el agua (Garfí et al., 2019).

La digestión anaeróbica de RSU se ha estudiado generalmente en codigestión con otros sustratos, a escalas que van desde el laboratorio a biodigestores de gran escala. Sin embargo, la monodigestión de RSU es importante tenerla en consideración, dado la disponibilidad limitada de algunos sustratos para aplicar codigestión en condiciones reales (Martí-Herrero et al., 2019). Recientemente, en América Latina se están impulsando iniciativas y esfuerzos gubernamentales para separar la fracción orgánica de los RSU. Los residuos orgánicos seleccionados se transfieren a plantas de compostaje en donde no hay disponibilidad regular de sustratos adicionales, por lo cual la monodigestión de RSU puede ser una alternativa de solución.

Abonos y enmiendas orgánicas para el establecimiento de agricultura orgánica

Una tecnología segura, eficaz, respetuosa con el medioambiente, económica y factible de desarrollar es la agricultura orgánica, la cual consiste en un conjunto de prácticas en las que se aprovechan los recursos naturales en su totalidad para la producción de un cultivo agrícola (Meng et al., 2017; Connor, 2018).

A través de esta práctica, se favorecen los procesos productivos agrícolas por medio de la generación y uso de abonos y enmiendas orgánicas, con el fin de reducir el uso de insumos agropecuarios de origen químico (Singh et al., 2011; Meng et al., 2017).

Las enmiendas orgánicas se generan a partir de la transformación de los residuos orgánicos (materia orgánica), lo que da como resultado la mineralización de nutrientes y la síntesis de compuestos húmicos, disponibles en el suelo para su reutilización en la nutrición vegetal (Tarigo et al., 2004; Álvarez-Solís et al., 2010). Las enmiendas están compuestas por elementos minerales y microorganismos capaces de descomponer residuos orgánicos, ocasionando el mejoramiento del ciclo de nutrientes, la reducción de contaminantes y el control de plagas y enfermedades de plantas. Además, las enmiendas pueden aportar nutrientes a las plantas e influir positivamente en las propiedades fisicoquímicas del suelo, al mediar la interacción entre los componentes bióticos y abióticos de este (Singh et al., 2011; Azadi et al., 2011; Chauhan et al., 2015).

Los microorganismos presentes en las enmiendas son los responsables de la transformación de la materia orgánica, a la vez que representan un reservorio de nutrientes. Las especies, cantidad y mecanismos, están regulados por las características de composición de la materia orgánica (Álvarez et al., 2010).

Biofertilizantes: definición y aplicación

Los biofertilizantes pueden ser considerados como enmiendas del suelo, por tratarse de abonos líquidos (Tarigo et al., 2004); estos se generan a partir de la transformación de la materia orgánica proveniente de residuos orgánicos de la producción agrícola y animal, agua y nutrientes minerales (Asadu et al., 2020; Cavalcante et al., 2019).

La fermentación de la materia orgánica ocurre bajo la ausencia total o parcial de oxígeno atmosférico, y en condiciones controladas de temperatura y pH, entre otros factores. Lo que da como resultado minerales biodisponibles para la asimilación por parte de las plantas, aportando a su nutrición y protección (Restrepo, 2007; Mohammadi & Sohrabi, 2012; Wang et al., 2015).

Se entienden como compuestos bioactivos debido a que contienen como principio activo un agente orgánico, que puede estar conformado por células vivas o latentes de microorganismos y sus metabolitos. Los cuales, son capaces de degradar la materia orgánica, favoreciendo la nutrición vegetal y elevando la productividad de los cultivos, condicionando, a su vez, su tiempo de vida útil, su rendimiento y la actividad de estos bajo condiciones ambientales (Mohammadi & Sohrabi, 2012; Wang et al., 2015).

A pesar de los beneficios evidentes de los biofertilizantes, el uso de estos aún puede verse restringido por causa de las políticas de uso establecidas por cada país y la fiabilidad de su bioseguridad, debido a que pueden contener organismos potencialmente patógenos. Adicionalmente, los biofertilizantes requieren de un periodo de tiempo relativamente largo para evidenciar su acción en los cultivos, así como de condiciones especiales de almacenamiento y transporte (Mohammadi & Sohrabi, 2012; Meng et al., 2017).

Microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPR)

Son microorganismos que se encargan de solubilizar los nutrientes que se encuentran en la atmósfera y en el suelo, facilitando su disponibilidad para las plantas. Estos microorganismos sintetizan hormonas de crecimiento vegetal, regulan el estrés vegetal y proporcionan acción represora o inhibidora de fitopatógenos, por la producción de antibióticos, hidrólisis de moléculas de los patógenos, síntesis de quitinas, entre otros procesos. Además, estos organismos pueden ser útiles en la recuperación de suelos contaminados con pesticidas (Singh et al., 2011; Chauhan et al., 2015; Rodríguez et al., 2019).

En estos se incluyen bacterias conocidas comercialmente de los géneros *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia* (Singh et al., 2011; Chauhan et al., 2015; Subramaniam et al., 2015; Rodríguez et al., 2019).

Residuos útiles como materia prima de los biofertilizantes

Los biofertilizantes pueden consistir en inóculos microbianos, compuestos por bacterias, hongos, actinomicetos o microalgas, aportando al suelo como promotores de crecimiento vegetal (Mohammadi & Sohrabi, 2012).

También los biofertilizantes pueden originarse a partir de subproductos de origen vegetal y de origen animal, estos últimos se componen por tejidos ricos en proteínas, colágeno y queratina. A su vez, las heces de animales también pueden ser utilizadas para la generación de biofertilizantes, ya que otorgan nutrientes, una gran cantidad de compuestos húmicos y de microorganismos (Tarigo et al., 2004).

Preparación de biofertilizantes

La preparación de biofertilizantes consiste en la selección del material portador del o los organismos de interés (residuos orgánicos) y la selección del método de riego (propagación del organismo de interés), seguido de las pruebas de evaluación de su eficacia a pequeña y gran escala (Mohammadi & Sohrabi, 2012).

Se utiliza un inóculo microbiológico que usualmente consiste en heces de animales de producción pecuaria (bovinos, caprinos, aves de corral), las cuales, idealmente, deben ser frescas y provenir de animales que no hayan sido tratados recientemente con antibióticos o antiparasitarios. También se utiliza agua, preferiblemente no tratada, que puede ser agua lluvia o de algún afluente natural, melaza y leche. Si se desea, se puede añadir sales minerales, rocas molidas o harinas como suplemento de los nutrientes que se encuentren en poca cantidad o ausentes en los sustratos, generando así biofertilizantes enriquecidos (Galindo et al., 2007).

Su elaboración en campo se realiza en recipientes de plástico oscuro y cerrados, para evitar la afección del proceso por factores ambientales desfavorables. Asimismo, los tanques se ubican en zonas protegidas del sol y la lluvia (Restrepo, 2001).

Proceso de transformación de los residuos

Los biofertilizantes se pueden generar a partir de un proceso de digestión anaerobia o de fermentación aerobia (Tarigo et al., 2004).

El primero, está enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono, donde se genera biomasa microbiana y compuestos de tipo inorgánico como CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2 y CH_4 . Debido a que en este proceso se utilizan los subproductos de la degradación de la materia orgánica en su totalidad, resultan productos con mayor cantidad de nutrientes en comparación con los procesos aerobios (Tarigo et al., 2004; Alfa et al., 2014).

En general, durante las dos primeras fases de la digestión anaerobia denominadas *hidrólisis* y *acidogénesis*, se hidrolizan proteínas, grasas y carbohidratos, generando monómeros de azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y ácidos volátiles, y se liberan iones de hidrógeno, lo que ocasiona una reducción en el pH (Cavalcante et al., 2019).

A continuación, en la tercera fase, la acetogénesis, los subproductos de las fases anteriores (alcohol, ácidos y compuestos aromáticos) se degradan produciendo acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la metanogénesis, la cuarta y última etapa de la digestión anaerobia, se producen metano y dióxido de carbono, lo que acarrea el incremento de pH entre 6,5 y 7,5 (Cavalcante et al., 2019).

Anaerobiosis

Es necesario asegurar la ausencia de oxígeno en el medio con el fin de no alterar los procesos propios de la digestión anaerobia, lo que se logra con el hermetismo del sistema (Tarigo et al., 2004).

Características microbianas

Los microorganismos presentes en cada una de las etapas son los mediadores de los procesos de digestión anaerobia. En la fase de hidrólisis y acidogénesis se presentan bacterias hidrolíticas de tipo aerobio facultativas, como enterobacterias; aerotolerantes, como lo son las acidolácticas; y anaerobias, como los *Clostridium* sp. (Tarigo et al., 2004).

Por otro lado, en la acetogénesis predomina la presencia de bacterias anaerobias facultativas y estrictas, mientras que las responsables de la metanogénesis son bacterias anaerobias estrictas de tipo metanogénico (Cavalcante et al., 2019).

Propiedades fisicoquímicas del proceso

El pH óptimo para la operación del sistema se encuentra entre 5,5 y 8 unidades, para evitar la inhibición de las bacterias involucradas en el proceso (Tarigo et al., 2004; Alfa et al., 2014).

Es posible que los ácidos generados se acumulen en el sistema, afectando el establecimiento de las bacterias metanogénicas, las cuales se caracterizan por ser extremadamente sensibles a cambios abióticos en el ambiente. La temperatura tiende a incrementarse debido a la actividad metabólica de los organismos allí involucrados, siendo los valores óptimos entre 15 y 40 °C a lo largo del proceso. Alteraciones en esta variable ocasionarán la inhibición de la microbiota responsable

de cada fase, así como su actividad enzimática debido a la desnaturalización de estas. La relación C/N idónea en este proceso debe ser de 30/1, para asegurar la asimilación de los compuestos nitrogenados.

De otra parte, el tiempo de retención dictará las características del producto final, y por lo tanto es necesario establecerlo de acuerdo con el producto de interés. Si el tiempo de retención es muy extenso, la producción de biogás se reduce considerablemente, sin embargo, el biol obtenido (biofertilizante) será muy estable, por lo tanto, será de mejor calidad. En cambio, si el tiempo de extensión es relativamente corto, se generará una considerable cantidad de biogás, pero el biol obtenido debe estabilizarse, y en algunos casos debe sufrir nuevos procesos de fermentación, previo su uso como biofertilizante. La agitación se realiza con el fin de asegurar la disposición de la materia orgánica ante la microbiota presente, con el fin de asegurar la degradación de este sustrato.

Para el caso de la degradación aerobia, el proceso consiste en disponer los residuos vegetales, heces de animales y compost en un recipiente con agua, y se dejar reposar. Posteriormente, se procede a la extracción de los bioles o purines, ya sea mediante un sistema pasivo o activo (Tarigo et al., 2004):

- Sistemas de extracción pasivos: no intervención (agitación u oxigenación) en el sistema. Entre 24 y 48 horas el sistema inicia una fase de anaerobiosis, lo que reduce la calidad del fermento.
- Sistemas de extracción activos: el sistema se oxigena mediante agitación, difusores o filtración de la fase líquida, así se asegura el incremento en la población microbiana y por lo tanto en su actividad degradativa.

Tipos de biofertilizantes

A base de heces de bovino (caldo magro)

En un recipiente con capacidad de 200 L con una adaptación (hermética) de un escape de gases, se disponen 180 L de agua sin tratar, 2 L de leche o suero, 2 L de melaza, 50 kg de heces de bovino y 3 kg de cenizas, si se desea enriquecer el fertilizante se puede añadir, a lo largo del proceso, roca fosfórica y sales minerales, formando así una mezcla que se sella herméticamente y se deja fermentar a temperatura ambiente (Restrepo, 2007; Llamas et al., 2015).

Se debe tener en cuenta que si la temperatura ambiental ronda entre 30 y 38 °C, el fertilizante se obtiene en 90 días, sin embargo, si la temperatura ambiental es cercana a los 20 °C, el tiempo de retención será de 180 días (Llamas et al., 2015). Para su aplicación foliar, se realiza una dilución en agua limpia a razón de 1:10.

Caldo Supermagro

Fertilizante enriquecido ideado por el técnico agrícola Delvino Magro para la fertilización de un cultivo de manzanas en Rio Grande del Sur en Brasil. Ha sido utilizado como referencia para su uso en cultivos de tomate, maíz, hortalizas, cultivos anuales, cultivos de plantas perennes y follajes, cultivos ornamentales y frutales, alternado su composición de acuerdo con los requerimientos nutricionales de cada especie vegetal. También se utiliza para la recuperación de plantas a causa de factores climáticos (Tarigo et al., 2004; Restrepo, 2007; Machado, 2010). Su preparación consta de diversas etapas que se desarrollan a lo largo del proceso, añadiendo, en un periodo de cada tres días, diferentes sales minerales en diversas proporciones, hasta el día 40 del inicio del proceso. Posteriormente se deja fermentar nuevamente por 15 días más, luego se filtra conservando la fase líquida. Esta última, se diluye en agua limpia a relación de 0,02:1 o 0,1:1 (Restrepo, 2007).

Purín de gallinaza

La gallinaza es un residuo proveniente de la industria que consta de una mezcla de heces, orina, una porción no digerida de alimentos, microbiota entérica, plumas y huevos rotos. Se caracteriza por contener grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio (Carhuancho et al., 2015; López, 2015). Este residuo debe ser tratado previo a su uso como biofertilizante, para evitar efectos de toxicidad en las plantas y minimizar la presencia de microorganismos patógenos. Esto se logra mediante procesos fermentativos de compostaje o digestión anaerobia (López, 2015).

El purín de gallinaza es una técnica en la que se convierte la gallinaza en estado sólido en un abono líquido, rico en nutrientes y microorganismos benéficos del suelo (Chan et al., 2016). La preparación de los purines se realiza colocando 15 kg de gallinaza en un costal, el cual se deposita en un recipiente con 200 L de agua. Posteriormente se deja fermentar por 15 días, agitando una vez al día todos los días. Para su posterior aplicación, el purín se diluye en agua limpia, en una relación de 1:4 (Chan et al., 2016).

Compostaje, definición y aplicación

El compostaje es un proceso que permite el aprovechamiento de diversos nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, al ser utilizado como una enmienda del suelo, a partir de la generación de un producto estable conocido como compost (Rawotteea et al., 2017).

El compostaje puede ser utilizado como una técnica para el manejo de algunos residuos orgánicos generados por diferentes actividades antropogénicas,

creando beneficios sobre la higiene y salubridad de la comunidad, eficiencia en los procesos de tratamiento de residuos y generación de productos agregados, como enmiendas del suelo, lo que coincide con los principios de una agricultura sostenible (Putranto & Dong, 2017; Chukwudi et al., 2017).

En este proceso, los compuestos derivados de los residuos orgánicos son mineralizados, hasta la generación de elementos como CO_2 , NH_3 , H_2O , ácidos húmicos (elementos carbonados que contribuyen a la formación y protección del suelo) y compost (un producto estable, de baja toxicidad y microbiota patógena). Los cuales favorecen la actividad microbiana, contribuyen a la retención de agua y a la fertilización del suelo (Chukwudi et al., 2017).

Residuos compostables

La mayoría de los residuos orgánicos pueden ser sometidos a un proceso de compostaje, incluyendo RSU orgánicos, lodos, heces de animales, etc., los cuales están compuestos por carbohidratos, proteínas y lípidos que son degradables por microorganismos que utilizan estas moléculas como materia prima para la obtención de energía y la generación de biomasa (Sylvia et al., 1999).

No se deben compostar residuos tóxicos o inorgánicos, como derivados del petróleo (gasolina, aceites de vehículo, pintura, etc.), solventes (orgánicos e inorgánicos), materiales xenobióticos (plástico, vidrio, etc.), tabaco, antibióticos o residuos de medicamentos (Román et al., 2013).

Proceso de transformación de los residuos

El compostaje es una fermentación aerobia y de estado sólido en la que ocurre una variación de la temperatura producto de la actividad microbiana, que, a su vez, condiciona cada una de las fases que conforman el procedimiento. El proceso fermentativo resulta de la descomposición de la materia orgánica, a medida que genera las condiciones óptimas para el establecimiento y desarrollo de los microorganismos degradadores de materia orgánica, e inhibe la presencia de microorganismos patógenos (Chukwudi et al., 2017; Rawoteya et al., 2017).

Durante la fase mesófila, los microorganismos involucrados habitan en ambientes de un rango de temperatura entre 20 y 40 °C, que se encargan de la degradación de proteínas, azúcar y almidón fácilmente degradables, ocasionando un incremento de la temperatura por encima de los 60 °C (Sylvia et al., 1999; Araras et al., 2008)

Lo anterior da paso al establecimiento y desarrollo de la microbiota termófila, la cual se encarga de la degradación de biocompuestos complejos de la materia

orgánica tales como polisacáridos (almidón y celulosa), lípidos y proteínas, a la vez que se inhibe el crecimiento de los organismos patógenos y arvenses (Chukwudi, et al., 2017).

Asimismo, en esta fase ocurre el proceso de higienización del compost, pues, debido a las altas temperaturas que se alcanzan, se elimina la presencia de microorganismos patógenos (Román et al., 2013).

Posteriormente, se evidencia una nueva fase mesófila, donde la temperatura desciende nuevamente alrededor de 20 °C. Esta, al igual que la primera fase, incluye la degradación de los compuestos fácilmente degradables restantes, dando lugar a la fase de enfriamiento o maduración, en la que la temperatura del proceso disminuye hasta alcanzar la temperatura ambiental y el sustrato transformado se estabiliza para su posterior uso (Putranto & Dong, 2017; Chukwudi et al., 2017).

Un compost madurado adecuadamente no debe contener sustancias tóxicas para el ambiente o las plantas, tales como gases de efecto invernadero, como ácido sulfhídrico y dióxido de nitrógeno (H_2S y NO_2) o metano (CH_4) (Román et al., 2013).

Aireación

A lo largo del proceso es necesario airear la mezcla, para lo que se realizan volteos del material en transformación, lo que permite liberar la temperatura y los gases producidos durante el proceso, a la vez que se homogeneiza el sustrato y se dispone para la acción microbiana (Henaó & Zapata, 2008; Rawotteea et al., 2017).

Características microbianas

Al tratarse de una fermentación aerobia en el proceso priman los microorganismos mesófilos entre los que se destacan bacterias como *Pseudomonas* sp., *Klebsiella* sp. y *Xanthomonas* sp., y hongos como *Alternaria* sp., *Aspergillus* sp. y *Penicillium* sp. Por otra parte, en la fase termófila se conoce la presencia de algunas bacterias anaerobias, como es el caso de *Clostridium* spp., bacterias aerobias como *Bacillus* spp. y *Actinomyces*, y hongos como *Aspergillus fumigatus* y *Mucor* sp. (Sylvia et al., 1999).

La actividad microbiana está mediada por la síntesis de enzimas hidrolíticas extracelulares (lipasa, amilasa y celulasa), que degradan compuestos complejos en otros más simples que son solubles en agua (Sylvia et al., 1999). La presencia de determinados grupos microbianos depende de las condiciones fisicoquímicas de cada una de las etapas que se presentan en el proceso (Chukwudi et al., 2017), lo que, a su vez, condiciona el desarrollo del compostaje, viéndose influenciado,

entre otros, por factores como la temperatura, el pH, la humedad relativa y la conductividad eléctrica, la tasa de respiración y aireación, la densidad aparente y la frecuencia de los volteos, así como la relación carbono-nitrógeno y las características de los sustratos utilizados (Putranto & Dong, 2017; Rawoteea et al., 2017).

Propiedades fisicoquímicas del proceso

El pH durante el proceso tiende disminuir en las dos primeras etapas debido a la síntesis de ácidos orgánicos, la mineralización de compuestos nitrogenados y fosforados, y la volatilización del amoníaco resultante de la nitrificación (efecto derivado del incremento del pH). Por otro lado, tiende a neutralizarse en las dos últimas etapas, debido a la degradación de los ácidos orgánicos y la acumulación de amoníaco producto de la degradación proteica (nitrificación). Siendo un pH del compost ideal en un rango entre 5,5 y 8,5 unidades de pH.

Esta variable es un indicador de la actividad microbiológica, donde si el pH disminuye a valores <5 la actividad biológica se considera muy baja, y si se alcaliniza puede inhibir el desarrollo de microorganismos inhibidores de la biota patógena (Heno & Zapata, 2008; Chukwudi et al., 2017).

De otro lado, la temperatura permite monitorear el procedimiento e interviene directamente en la eficiencia del proceso, reduciéndose si la temperatura incrementa o disminuye drásticamente, debido a su rol en la eliminación de agentes patógenos al alcanzar valores superiores a los 60 °C y en la biodisponibilidad de los nutrientes que conforman el sustrato, ya sea por la degradación o por la acción de la microbiota termófila que incrementa el pH (Chukwudi et al., 2017). La temperatura se puede ver afectada por el tamaño de la pila incrementando el autocalentamiento de esta, puesto que cuenta con una mayor proporción de volumen por área de superficie y la temperatura ambiental, ya que disipa el calor al ambiente al ser menor que el de la pila (Putranto & Dong, 2017).

La *relación C/N* (25-30:1) indica la proporción entre carbono (fuente de energía) y nitrógeno (promotor de estructuras celulares) presente en el compostaje (Chukwudi et al., 2017); se trata de un balance en el proceso degradativo que asegura las concentraciones adecuadas de cada elemento en el compost, ya que una baja concentración de nitrógeno limita el desarrollo microbiano, lo que ralentiza la descomposición y, por ende, la disponibilidad de las moléculas de carbono; por otro lado, con una concentración alta de nitrógeno este elemento se reduce a amoníaco y se volatiliza fácilmente (Chukwudi et al., 2017).

La humedad relativa puede variar entre 40 y 70% (P/V), siendo el 60% un valor ideal en el que el proceso se acelera, y 20% un valor en el que el proceso

se detiene por un cese en la actividad biológica (Putranto & Dong, 2017). La humedad influye: 1) sobre la tasa de absorción del oxígeno, puesto que si es muy alta la velocidad de difusión de O_2 se reduce y puede llegar a ser insuficiente, e incluso alcanzar un estado anaerobio, restringiendo la actividad de degradación deseada; 2) sobre la temperatura, ya que esta relación es inversa, así, si una incrementa la otra disminuye; y 3) sobre la porosidad, por la distribución y solubilidad de nutrientes (Henaó & Zapata, 2008; Chukwudi et al., 2017).

Por otro lado, un incremento en la humedad puede ser desfavorable para el sistema, ya que el calor producido durante el proceso se utilizará en la evaporación del agua y no en mantener las condiciones ideales para el desarrollo microbiano; sin embargo, también puede favorecer la anaerobiosis del compostaje (Putranto & Dong, 2017).

La frecuencia con la que se realizan los *volteos* actúa directamente sobre algunas características que indican la maduración del compost tales como: concentración de nitrógeno, pH, relación C/N, carbono total, temperatura, reducción de la compactación, etc. Siendo más favorable para el proceso establecer un régimen de volteo que dependerá del tamaño de la pila y la composición del sustrato, que debe realizarse constantemente entre tres días, una vez por semana (Röben, 2002; Chukwudi et al., 2017).

La *conductividad eléctrica* indica la concentración de sales en compost, la cual incrementa durante la descomposición. Un incremento en esta variable puede deberse a la presencia de iones de amonio, fosfato y la volatilización del amoníaco; su disminución es producto de la precipitación de las sales en mención. Un compost ideal para uso agrícola debe tener un valor de conductividad eléctrica baja, inferior a 3 ms cm^{-1} , ya que la salinidad puede interferir en la germinación y crecimiento de las plantas (Chukwudi et al., 2017).

Sistemas de compostaje

Los sistemas de compostaje se pueden categorizar en procesos de *modo de operación* tipo lote o continuo. En el primer caso el proceso se desarrolla como un sistema cerrado, al no ser alimentado ni inoculado, puesto que no se adiciona materia orgánica nueva ni inóculo nuevo al sistema, y tampoco se retira producto. En este caso, eventualmente, la materia orgánica es transformada en su totalidad, los nutrientes se agotan, la temperatura y los microorganismos presentes en cada etapa varía de manera sucesiva a lo largo del proceso, hasta alcanzar la estabilización (Sylvia et al., 1999).

En el segundo caso, la materia orgánica es constantemente adicionada al sistema, también se adicionan aditamentos que estimulan el crecimiento de la microbiota, y el compost generado es constantemente recolectado (Sylvia et al., 1999).

A su vez, los sistemas de compostaje se pueden clasificar, de acuerdo con su tipo de *agitación*, en estáticos y agitados (Röben, 2002; Henao & Zapata, 2008; Román et al., 2013). En los procesos de compostaje estático el material permanece inmóvil durante todo el proceso y su aireación se logra mediante inyección. En los procesos agitados, en cambio, el material se mueve periódicamente. En estos últimos, el material se tritura hasta obtener un tamaño de partícula de 2,5 a 5 cm, y se asegura una humedad relativa de 50 a 60%, posteriormente se procede a disponerlo en hileras o en pilas, las cuales pueden alcanzar de 2 a 3 m de alto y 4 m de ancho.

Las características propias de cada pila, así como el tiempo de retención en cada proceso y su agitación, están condicionados por diversos factores, entre los que se destacan: la cantidad de material, la maquinaria utilizada para realizar los volteos y el espacio en que se desarrollará el proceso.

- Compostaje en pila: a lo largo del proceso, aproximadamente cada dos semanas, se realiza el volteo del material monitoreando la temperatura que no ascienda por encima de los 60 °C. Finalmente, se deja estabilizar sin voltearlo por un periodo de tres a cuatro semanas. En este caso las pilas no deben tener una altura mayor a 1,5 m, para evitar el desarrollo de condiciones anaerobias.

Los periodos de volteo pueden variar de acuerdo con las condiciones ambientales en que se esté desarrollando el proceso de compostaje, siendo más recurrentes y en menor cantidad en zonas con una temperatura ambiental superior a los 30 °C, y mucho menos periódicos en zonas con temperaturas inferiores a 20 °C.

Los volteos pueden realizarse de manera manual, utilizando herramientas como palas. También se puede realizar de forma mecanizada en la que se utiliza maquinaria con una pala frontal o un mecanismo de tornillo sin fin.

- Compostaje en pila estática con aireación forzada: debajo de las pilas, se ubica una red de tuberías perforadas a través de las que se inyecta aire. En este caso las pilas pueden alcanzar tamaños de 2 a 3 m de altura, ya que la aireación no depende de los volteos.
- Compostaje en reactores: en este sistema se considera como reactor cualquier recipiente en el que ocurra la fermentación. Los reactores pueden ser tanto agitados como estáticos.

Productos derivados del compostaje

Vermicompost (lombricompost)

En este tipo de compostaje se utilizan lombrices de las especies *Eisenia foetida* (conocida como lombriz roja californiana, y es la más comúnmente utilizada en estos procesos), *Eisenia andrei* y *Lumbricus rubellus*, para complementar el sistema tradicional de compostaje.

Estas se alimentan de la materia orgánica, transformándola y liberando en forma de excreta como humus, el cual deja en el suelo nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, además, favorece la proliferación y dispersión de microorganismos descomponedores (Röben, 2002).

Las lombrices utilizadas en este proceso se caracterizan por desarrollarse a una temperatura entre 19 y 25 °C, a una humedad del 80%, un pH entre 6,5 y 7,5 unidades, y baja intensidad lumínica. Así como una alta cantidad de materia orgánica en el sustrato (Román et al., 2013).

Té de compost

Extracto de compost solubilizado en agua, realizando un proceso que emula la infusión de hierbas, que consiste en colocar el compost en una tela, depositarla en un tanque de agua y así obtener, por un lado, todos los compuestos del compost que se solubilizan en el agua y, por otro lado, algunos microorganismos (Román et al., 2013).

Bioingeniería para el control y automatización de procesos para el aprovechamiento energético de residuos

Actualmente el concepto de sostenibilidad en su más amplio espectro se encuentra completamente ligado con la generación y el aprovechamiento de energía, necesariamente ambos conceptos deben complementarse entre sí para lograr los más altos estándares de desarrollo sostenible (Kumar et al., 2019). Lo anterior implica responder responsablemente con el incremento en la demanda de energía, con la premisa clara de resguardar los recursos naturales, por lo cual, el desarrollo de fuentes alternativas de energía es fundamental (Lakhan, 2017). En particular, el uso de la biomasa, obtenida a través de residuos en el sector agroindustrial en países mayoritariamente agrícolas como el nuestro, ofrece una oportunidad única para generar energía verde (Onwurah et al., 2006). Sin embargo, a pesar del evidente potencial, actualmente existen un sinnúmero de desafíos asociados con la recolección, separación, pretratamiento, tratamiento y disposición final de los resi-

duos. Todo ello limita sustancialmente la implementación de estrategias de gestión pública para su aprovechamiento como una fuente estable de energía alternativa a baja y mediana escala, que, en un futuro, permita suplir parcialmente la demanda de energía nacional.

La bioingeniería en Colombia tiene como uno de sus pilares fundamentales las energías alternativas, las cuales buscan proporcionar herramientas tecnológicas para solventar algunos de los desafíos existentes en la cadena de transformación y aprovechamiento energético de residuos WTE (Waste-to-Energy). Tradicionalmente, las tecnologías como el peletizado, la pirólisis, la combustión y la gasificación han sido las más usadas para extraer valor de los residuos y completar el ciclo del WTE (Lakhan, 2017). Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el interés por tecnificar e implementar técnicas de control y automatización para optimizar procesos biológicos como los descritos a lo largo de este capítulo: digestión aerobia, digestión anaerobia, compostaje, procesos de lodos activos, y producción de biocombustibles (Kumar et al., 2019).

En particular, las teorías de control de procesos involucran el diseño de sistemas de control automático para equipos y plantas de transformación biológica, química y fisicoquímica. En estos equipos, una de las tareas fundamentales consiste en medir y manipular variables tales como flujo, nivel, temperatura, humedad, entre otras (Smith & Corripio, 2005). El objetivo principal de la teoría de control es dirigir las variables más relevantes del proceso a un valor deseado y mantener las condiciones de operación durante la ejecución de los procesos de transformación (Love, 2007). Los procesos de control modernos usan técnicas de control digital, técnicas de internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial y tecnología de la información para optimizar tanto el proceso como la interacción con el usuario final.

En la actualidad, algunos procesos de transformación de residuos ya implementan técnicas de control automático y automatización. Un ejemplo de lo anterior es la construcción de biorreactores, los cuales representan un componente fundamental para cualquier proceso que involucra el cultivo de microorganismos. A través de la implementación de biorreactores, se busca garantizar las condiciones fisicoquímicas y biológicas óptimas para el proceso de fermentación, como nivel de nutrientes, pH, temperatura y aireación, para cada uno de los puntos de operación, los cuales deben depender directamente de la naturaleza de los microorganismos (Onwurah et al., 2006).

Adicionalmente, a una escala menor, con la ayuda de técnicas de monitoreo y control, es posible transformar residuos orgánicos como los residuos de cocina para generar compost de forma eficiente. El periodo de compostaje se puede monitorear

y controlar manipulando, por ejemplo, variables como conductividad del sustrato, temperatura, humedad y proporción de carbono-nitrógeno. Una vez establecido el punto deseado de operación, el correcto monitoreo puede acelerar el proceso de compostaje (Lakhan, 2017).

De forma similar, en los biodigestores anaerobios a baja y mediana escala se pueden instalar sistemas de monitoreo y control que permitan optimizar los tiempos de digestión en cada una de las etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). A través de las técnicas de control se pueden establecer diferentes condiciones de operación, las cuales varían según la concentración de microorganismos en cada etapa, las cuales se pueden alcanzar controlando la concentración y proporción de nutrientes, el pH y la temperatura. Adicionalmente, se pueden establecer condiciones aerodinámicas e hidrodinámicas usando actuadores electromecánicos para mejorar la transferencia de calor, el flujo y la transición del sustrato entre etapas, así como para aumentar la homogeneidad de la mezcla entre diferentes sustratos al interior del biodigestor (Kumar et al., 2019). Todo lo anterior permite producir de manera eficiente gases como CO_2 , CH_4 , NO_2 y NH_3 , además de biofertilizantes.

A nivel industrial, desde la década de los noventa las técnicas de automatización y control han fomentado la tecnificación del tratamiento de RSU a través de grandes plantas en países de Europa y Estados Unidos. En diferentes procesos de transformación termoquímica, como la combustión, la gasificación y el pirólisis, se han implementado sistemas automáticos para controlar el contenido de atmósferas específicas enriquecidas con oxígeno, o incluso en ausencia total del mismo, para la transformación de residuos sólidos con bajo contenido de humedad, buscando incrementar la productividad y reducir las emisiones contaminantes

La tecnificación y automatización de los procesos bioquímicos para la transformación de residuos con alto contenido de humedad se ha centrado en procesos asociados a la industria de los biocombustibles (Kumar et al., 2019). En la digestión anaerobia también es posible transformar los residuos en fuentes de energía calórica o eléctrica, sin embargo, la producción de biocombustibles como metanol, etanol y biodiésel ha demostrado mayor beneficio económico a corto y mediano plazo.

Desde una perspectiva operacional, los sistemas de control les proporcionan a los procesos de transformación WTE facilidad para realizar cambios, monitorear el proceso y optimizar el desempeño (Love, 2007). Además del control automático, la automatización de los procesos también involucra teorías de gestión y seguridad, que en procesos como la combustión directa y la gasificación son fundamentales (Smith & Corripio, 2005).

Por otra parte, si bien los avances en disciplinas como la ingeniería química y la microbiología se encuentran relativamente maduros, aún existen desafíos que a través de la sinergia con otras disciplinas como la bioingeniería y la automatización de procesos pueden ser abordados. Técnicas avanzadas de control multivariable, control predictivo e inteligencia artificial representan una gran oportunidad para fomentar, a través de las tendencias tecnológicas actuales, el aprovechamiento de residuos como fuente de energía y como mecanismo de control ambiental.

Perspectivas del aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en pequeños productores.

A nivel mundial, más de 300 millones de toneladas de RSU por año se disponen en rellenos sanitarios, y solo 140 millones, aproximadamente, son aprovechados o tratados (Gómez, 2019).

En países como Canadá, China y Alemania, el aprovechamiento de residuos sólidos corresponde a 27%, 30 % y 47%, respectivamente; mientras que, en Colombia, se recicla solo el 17% de los residuos totales que se generan, lo que demuestra la importancia de generar y establecer tecnologías accesibles y eficientes que permitan dar un manejo adecuado a los residuos urbanos orgánicos, con bajo impacto negativo ambiental (Gómez-Soto, 2019).

En América Latina y del Caribe, en 16 ciudades en las que habitan más de 2 millones de habitantes, se generan 93 millones de toneladas por día de residuos sólidos, de los cuales el 50% corresponde a residuos y de los que únicamente el 2% son tratados (Henao & Zapata, 2008).

Política de gestión de residuos sólidos en Colombia

En Colombia, la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos, CONPES 3874 de 2016, indica la necesidad a migrar hacia una economía circular, en la que el valor de los productos y materiales se mantenga durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo.

El manejo integral de los residuos en esta política comprende su generación, separación en la fuente, recolección, transferencia y transporte, aprovechamiento, tratamiento y su disposición final (CONPES, 2016).

En Colombia, la generación de residuos sólidos por habitante se mide en producción per cápita por habitante (PPC), siendo en Bogotá de 0,95 kg/hab./día, en ciudades intermedias de 0,60 a 0,81 kg/hab./día, y en poblaciones pequeñas es de 0,31 kg/hab./día, de los cuales los residuos sólidos orgánicos representan el 65% del total de RSU (Castiblanco & Rodríguez, 2017).

En el modelo de la economía circular plasmado en el Conpes 3874, se plantea la reducción al mínimo en la generación de residuos, al igual que el uso de recursos mediante el uso repetido de un producto, una vez este alcance el fin de su vida útil, evitando que se convierta en residuo (CONPES, 2016).

Estos procesos de separación inadecuada en la fuente, y la poca cultura para el manejo de residuos sólidos, está relacionado con la informalidad en el aprovechamiento de residuos por parte de los recicladores de oficio, la ausencia de una normativa y de una campaña intensiva promovida por el Gobierno Nacional, mientras que los prestadores del servicio de aseo garantizan la recolección y transporte de los residuos domiciliarios para su disposición final (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Entre 90% y 93% de los residuos sólidos se disponen en sitios regionales, mientras que del 7% al 10% de residuos sólidos restantes se realiza en sitios municipales. Este último es el caso de municipios pequeños y remotos, en los que los costos de recolección y transporte no son rentables para realizar la disposición en sitios regionales, debido a la cantidad de residuos o a dificultades en el transporte, por causa de las distancias, la topografía, la geografía del territorio, o por el estado o la falta de vías (Superservicios, DNP y Presidencia de la República). En este último escenario, los diferentes mecanismos de transformación de los residuos orgánicos expuestos en este documento cobran un valor preponderante, dado que brindan no solo una alternativa para el manejo de los residuos como beneficio ambiental, sino también una alternativa para la producción de energía calórica y eléctrica, que puede impulsar el mejoramiento de la calidad de vida de poblaciones campesinas.

Finalmente, como se expuso a lo largo de este capítulo, las tendencias y alternativas para el aprovechamiento de los residuos entre las que se destacan los biodigestores, que producen biogás y fertilizante orgánico líquido, la generación de enmiendas orgánicas, entre las que se encuentran el compostaje, el vermicompostaje, la lombricultura y los biofertilizantes, ofrecen oportunidades únicas para las unidades militares rurales del Ejército Nacional de Colombia, así como a la población de influencia de estas unidades, como los pequeños productores agropecuarios.

Conclusiones

El aprovechamiento de los residuos orgánicos proporciona alternativas para evitar su acumulación, lo que contribuye a la reducción de la contaminación, debido a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, y mejora las condiciones de salud pública.

Por otra parte, la adición controlada de materia orgánica al suelo contribuye a mejorar su estructura y, por lo tanto, su capacidad de retención de agua; además, suministra nutrientes a las plantas, lo que permite un mayor rendimiento y mejor calidad de la producción vegetal, incentivando así la sostenibilidad del crecimiento en la producción agrícola local.

Entre las diversas alternativas tecnológicas existentes con respecto al aprovechamiento de residuos, se hace evidente la necesidad de adoptar la que más se adapte a la naturaleza del área impactada, destacando la importancia de poder obtener no solo energías alternativas, sino también fertilizantes orgánicos líquidos, que pueden aportar en la tendencia actual del consumo de productos alimenticios naturales que se produzcan con calidad, sin riesgo y que no generen impacto en el medioambiente.

Por otra parte, la investigación en áreas de la bioingeniería representa una enorme oportunidad para la tecnificación de los procesos de transformación WTE, dado que, a través del uso de métodos de control y automatización, se facilita realizar cambios controlados, monitoreo y optimización del desempeño de los procesos de transformación. Además, también permite involucrar teorías de gestión y seguridad, que en procesos como los descritos en este capítulo son fundamentales.

Para finalizar, la transferencia del conocimiento expuesto en este capítulo, a través del Ejército Nacional de Colombia, puede enriquecer el quehacer diario, el sistema productivo, la sostenibilidad y los encadenamientos económicos de pequeñas comunidades campesinas. Por lo anterior, se deben construir mecanismos eficientes y accesibles para la transferencia del conocimiento de estas técnicas y la disposición de las herramientas tecnológicas que permitan su implementación extensiva entre las diferentes unidades del Ejército en el territorio nacional, las poblaciones de pequeños productores y en sistemas territoriales de agricultura familiar.

Referencias

- Alfa, M., Adie, D., Igboro, S., Oranusi, U., Dahunsi, S., & Akali, D. (2014). Assessment of Biofertilizer Quality and Health Implications of Anaerobic Digestion Effluent of Cow Dung and Chicken Droppings. *Renewable Energy*, 63, 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.049>
- Álvarez-Solís J., Díaz-Pérez, E., León-Martínez, N., & Guillén-Velásquez, J. (2010). Enmiendas orgánicas y actividad metabólica del suelo en el rendimiento de maíz. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 239-245. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000300006
- Araras, B., Madigan, M., Martinko, J., Parker, J., Gacto, F., Rodríguez, F., & Sánchez, P. (2008). *Brock. Biología de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall.

- Asadu, C., Ike, I., Onu, C., Egbuna, S., Onoh, M., Mbah, G., & Eze, C. (2020). Investigation of The Influence of Biofertilizer Synthesized Using Microbial Inoculums on The Growth Performance of Two Agricultural Crops. *Biotechnology Reports*, 27, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00493>.
- Azadi, H., Schoonbeek, S., Mahmoudi, H., Derudder, B., De Maeyer, P. & Witlox, F. (2011). Organic Agriculture and Sustainable Food Production System: Main Potentials. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 92-94. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.001>.
- Carhuancho, F., Ramírez, J., & Guerrero, J. (2015). Gestión ambiental de residuos avícolas mediante digestión anaerobia para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos. *Anales Científicos*, 76(1), 125-132.
- Castiblanco J. D. & Rodríguez, E. (2017). Análisis del Manejo de los Residuos Sólidos Orgánicos y Reciclables, Generados en la Galería de Mercado Leopold Rhoter del Municipio de Girardot - Cundinamarca. (Trabajo de Grado para optar por el grado de Ingeniero Civil). Universidad Piloto de Colombia. Seccional del Alto Magdalena.
- Cavalcante, L., Bezerra, F., De Souto, A., Bezerra, M., De Lima, G., Gheyi, H., Da Silva, J., & Beckmann-Cavalcante, M. (2019). Biofertilizers in Horticultural Crops. *Comunicata Scientiae*, 10(4), 415-428.
- Chan, I., Santos, J., & García, A. (2016). Innovaciones tecnológicas en sistemas agrícolas de productores rurales de la localidad de San José Oriente, Hochtún, Yucatán, México. *Bioagrociencias. Innovaciones en sistemas agrícolas*, 9(1), 44-55.
- Chauhan, H., Bagyaraj, D., Selvakumar, G., & Sundaram, S. (2015). Novel Plant Growth Promoting Rhizobacteria - Prospects and Potential. *Applied Soil Ecology*, 95, 38-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.05.011>
- Chukwudi, O. Onwosi, V., Igbokwe, J., Odimba, N., Ifeanyichukwu, E. Eke; Mary, O. Nwankwoala; Ikemdinachi, N. Iroh; Lewis, I. Ezeogu. (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>
- Collins, M. (2017). *Organic Waste: Management Strategies, Environmental Impact and Emerging Regulations*. Nova Science Publishers, Inc.
- Connor, D. (2018). Organic Agriculture and Food Security: A Decade of Unreason Finally Implodes. *Field Crops Research*, 225, 128-129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.06.008>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES No. 3874]. (2016). Departamento Nacional de Planeación Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Ministerio de Educación Nacional Ministerio de Minas y Energía Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios Unidad de Planeación Minero energética.
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Informe nacional de aprovechamiento 2017 (N. 2)*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/3_informe_nacional_de_aprovechamiento_2017.pdf
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Informe de disposición final de residuos sólidos 2018 (N. 11)*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_nacional_disposicion_final_2019_1.pdf

- Galindo, A., Jeronimo, C., Spaans, E., & Weil, M. (2007). Los abonos líquidos fermentados y su efectividad en plántulas de papaya. *Tierra Tropical*, 3(1), 1-6.
- Garfi, M., Castro, L., Montero, N., Escalante, H., & Ferrer, I. (2019). Evaluating Environmental Benefits of Low-Cost Biogas Digesters in Small-Scale Farms in Colombia: A Life Cycle Assessment. *Bioresource Technology*, 274, 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.007>
- Gazzo, R. & Librandi, V. (s. f.). *Tratamiento de desechos y aprovechamiento*. Universidad de Palermo, Argentina. <https://www.palermo.edu/ingenieria/Pdf2010/Tratamiento.pdf>
- Gómez-Soto, J., Sánchez-Toro, Ó., & Matallana-Pérez, L. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. (Spanish). *Revista Facultad de Ingeniería - UPTC*, 28(53), 7-32. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v28n53/0121-1129-rfing-28-53-00007.pdf>
- Haghi, A. K. (2010). *Waste Management: Research Advances to Convert Waste to Wealth*. Nova Science Publishers, Inc.
- Henao, G. & Zapata L. (2008). *Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia*. (Monografía para optar al Título de Especialistas en Gestión Ambiental). Universidad de Antioquia.
- Jiménez, N. (2017). El residuo: producto urbano, asunto de intervención pública y objeto de la gestión integral. *Cultura y representaciones sociales*, 11(22), 158-192. <http://www.scielo.org.mx/pdf/crs/v11n22/2007-8110-crs-11-22-00158.pdf>
- Kumar, S., Kumar, R., & Pandey, A. (Eds). (2019). *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering, Waste Treatment Processes for Energy Generation*. Elsevier.
- Lakhan, R. (Ed). (2017). *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*. Springer Singapore.
- Llamas, B., Espinoza, F., Flores, J., & Flores, F. (2015). *Acciones para el desarrollo ambiental de las organizaciones de México: Estrategias de gestión y políticas públicas*. Competitive Press, S. A.
- López, L. (2015). *Biol y Gallinaza en la producción del ají tabasco (Capsicum annum) en la zona de Patricia Pilar* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Love, J. (2007). *Process Automation Handbook: A Guide to Theory and Practice*. Springer.
- Luste, S., & Luostarinen, S. (2010). Anaerobic Co-Digestion of Meat-Processing By-Products and Sewage Sludge-Effect of Hygienization and Organic Loading Rate. *Bioresource Technology*, 101(8), 2657-2664. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.071>
- Machado, M. (2010). *Biofertilizante como ferramenta para incrementar a diversidade microbiana visando o manejo de doenças de plantas* (Tesis de maestría). Universidade Federal de São Carlos.
- Martí-Herrero, J., Soria-Castellón, G., Diaz-de-Basurto, A., Álvarez, R., & Chemisana, D. (2019). Biogas from A Full-Scale Digester Operated in Psychrophilic Conditions and Fed Only with Fruit and Vegetable Waste. *Renewable Energy*, 133, 676-684. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.030>
- Meng, F., Qiao, Y., Wu, W., Smith, P., & Scott, S. (2017). Environmental Impacts and Production Performances of Organic Agriculture in China: A Monetary Valuation. *Journal of Environmental Management*, (188), 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.080>
- Mohammadi, K., & Sohrabi, Y. (2012). Bacterial Biofertilizers for Sustainable Crop Production: A Review. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 7(5), 307-316. <https://www.researchgate.net/publication/235613059>

- Onwurah, I., Ogugua, V., & Otitoju, O. (2006) Integrated Environmental Biotechnology Oriented Framework for Solid Waste Management and Control in Nigeria. *International Journal of Environment and Waste Management*, 1(1), 94-104.
- Putranto, A., & Dong, X. (2017). A New Model to Predict Diffusive Self-Heating During Composting Incorporating the Reaction Engineering Approach (REA) Framework. *Bioresource Technology*, 232, 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.065>
- Rawoteea, S., Mudhoo, A., & Kumar, S. (2017). Co-Composting of Vegetable Wastes and Carton: Effect of Carton Composition and Parameter Variations. *Bioresource Technology*, 227, 171-178.
- Restrepo, J. (2001). *Elaboración de abonos orgánicos fermentados y biofertilizantes foliares: experiencias con agricultores en Mesoamérica y Brasil*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Restrepo, J. (2007). *Biofertilizantes preparados y fermentados a base de mierda de vaca*. Impresora Feriva S. A.
- Röben, E. (2002). *Manual de compostaje para municipios*. DED Ecuador. <http://www.resol.com.br/Cartilha7/ManualCompostajeparaMunicipios.pdf>
- Rodríguez, P., Rothballer, M., Chowdhury, S., Nussbaumer, T., Gutjahr, C., & Falter-Braun, P. (2019). Systems Biology of Plant-Microbiome Interactions. *Molecular Plant*, 12(6), 804-821. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2019.05.006>
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Sarkar, A., & Singh, R. P. (2015). *Waste Management: Challenges, Threats and Opportunities*. Nova Science Publishers, Inc.
- Singh, J., Pandey, V., & Singh., D. (2011). Efficient Soil Microorganisms: A New Dimension for Sustainable Agriculture and Environmental Development. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(3-4), 339-353.
- Smith, C., & Corripio, A. (2005). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (3ª Ed). John Wiley and Sons.
- Subramaniam, G., Arumugam, S., Rajendran, V., Kumar, V., Laxmipathi, G., & Krishnamurthy, L. (2015). Plant Growth Promoting Rhizobia: Challenges and Opportunities. *Biotech*, 5(4), 355-377.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Departamento Nacional de Planeación y Presidencia de la Republica. (2019). Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos - 2018. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_nacional_disposicion_final_2019_1.pdf
- Sylvia, D., Fuhrmann, J., Hartel, P., & Zuberer, D. (1999). *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Editorial Prentice Hall.
- Tarigo, A., Repto, C., & Acosta, D. (2004). *Evaluación agronómica de biofertilizantes en la producción de lechuga (lactuca sativa) a campo* (Tesis de pregrado). Universidad de la República.
- Wang, H., Liu, S., Zhai, L., Zhang, J., Ren, T., Fan, B., & Liu, H. (2015). Preparation and Utilization of Phosphate Biofertilizers Using Agricultural Waste. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(1), 158-167.