

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS APLICABLES A LA GESTIÓN DEL
COMPONENTE ORGÁNICO ACOPIADO EN LAS INSTALACIONES DE
DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS**



MAROLIN TATIANA SOLÍS OLAYA

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

Popayán, Cauca

2025

**ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS APLICABLES A LA GESTIÓN DEL
COMPONENTE ORGÁNICO ACOPIADO EN LAS INSTALACIONES DE
DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS**

MAROLIN TATIANA SOLÍS OLAYA

Trabajo de investigación en la modalidad de monografía como requisito para optar al título
de Ingeniera Ambiental y Sanitaria

DIRECTOR:

Esp. ARNOL ARIAS HOYOS

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Popayán, Cauca

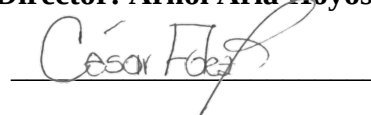
2025

Nota de aprobación

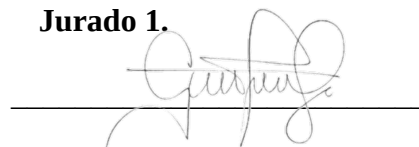
El director y los jurados del trabajo de grado, modalidad Monografía: **“ANÁLISIS DE TECNOLOGIAS APLICABLES A LA GESTIÓN DEL COMPONENTE ORGÁNICO ACOPIADO EN LAS INSTALACIONES DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS”**, realizado por: **MAROLIN TATIANA SOLIS OLAYA**, una vez revisado el informe final y aprobado la sustentación, autorizan para que se realicen los trámites concernientes para optar el título profesional de **Ingeniera Ambiental y Sanitaria**.



Director: Arnol Aria Hoyos



Jurado 1.



Jurado 2.

Popayán, Cauca, julio de 2025

Dedicatoria

A Dios por su bendición, a ti, Walter Solís, mi abuelo, quien ya no está físicamente presente, pero sigue presente en mis pensamientos, en mis pasos y en cada logro que alcanzo. Sé que me acompañaste en cada una de mis páginas y cada madrugada de esfuerzo. A mi madre, Jazmín Solís, y a mi abuela, Consuelo Olaya, por ser mis pilares de apoyo. Agradezco su apoyo incondicional, sus sacrificios en silencio y su lección de que todo es posible. A mis tías y hermana por siempre creer en mí y nunca abandonarme, especialmente a mi tía Emérita Solís.

A mí, por no rendirme, por cada noche sin dormir, por cada duda que convertí en una lección, por seguir adelante a pesar de la adversidad, por aprender a confiar en mis capacidades y por transformar mis caídas en fuerza para llegar hasta aquí.

Gracias a todos por ser mi motor silencioso, mi razón para seguir adelante y mi inspiración cuando más la necesitaba. Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios que esta etapa tan importante de mi vida haya culminado. No ha sido fácil llegar hasta aquí, por lo que quiero agradecer sinceramente a todos los que hicieron posible este logro.

Quiero expresar mi gratitud a mi familia, especialmente a Consuelo Olaya y Jazmín Solís, por ser mi refugio en los momentos difíciles, por su amor inquebrantable, por estar ahí para mí incluso cuando estaba lejos, por su paciencia y por ser mi mayor fuente de inspiración cada día. Gracias a mis primas, a mi hermana María José y a mis tías por estar ahí, apoyarme y escucharme.

Quisiera expresar mi gratitud a mi asesor, Arnold Arias, por su apoyo y dedicación académica, así como por su paciencia y disposición para contribuir significativamente al desarrollo de esta investigación.

Gracias a mis amigos y compañeros de trabajo por compartir este viaje conmigo, lleno de obstáculos, lecciones aprendidas y momentos felices y tristes. Sus palabras de apoyo hicieron que este proceso fuera más llevadero.

También quiero reconocer mi mérito por perseverar ante mis dudas y no rendirme. Este trabajo es solo una pequeña parte de todo lo que viví, sentí y superé; es más que una simple tesis. Muchas gracias a todos.

Tabla de contenido

Introducción.....	16
1. Planteamiento del problema	19
1.1. Descripción del problema.....	19
1.2 Formulación del problema.....	21
1.3. Justificación	21
1.3.1. Social	22
1.3.2. Ambiental	22
1.3.3. Académica	23
1.4. Objetivos.....	24
1.4.1. Objetivo general	24
1.4.2. Objetivos específicos	24
2. Estado del arte y bases teóricas	25
2.1. Estado del arte	25
2.2. Bases teóricas	29
3. Metodología.....	31
3.1. El enfoque mixto	31
3.2. Investigación descriptiva	31
3.3. Técnica de recolección de información	32
3.4 Procedimiento.....	32
3.4.1 Fase I. Identificación de los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.....	33
3.4.2. Fase II. Evaluación de los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en relleno sanitario de Bucheli del municipio de Tumaco Nariño.....	34
3.4.3. Fase III. Definir una alternativa tecnológica adecuada aplicadas a un caso en particular.....	35
4. Resultados y análisis.....	37

4.1 Identificación de los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.	37
4.2. Evaluación de los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en relleno sanitario	54
4.3 Análisis	79
5. Alternativas Tecnológicas para el manejo de residuos orgánicos	80
5.1.1. Tecnología de Compactación	85
5.1.2. Tecnología de Lombricultura	88
Importancia de la Lombricultura	88
5.1.3. Tecnología de Termólisis para residuos orgánicos.....	89
Beneficios de la Tecnología Termólisis	90
5.1.4. Tecnología de Vermicompostaje	90
5.1.5. Tecnología de lixiviados.....	92
5.1.6. Tecnología de Biodigestor.....	93
5.1.7. Tecnologías de valoración energética de los residuos.....	95
5.2 Tecnología aplicada para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el relleno sanitario Bucheli	97
5.2.1 Tecnología de Compostaje	97
5.2.2 Proceso del Compostaje.....	98
6. Discusión sobre Alternativas de Tecnologías aplicadas para el relleno sanitario Bucheli	106
7. Conclusiones.....	109
8. Recomendaciones	111
Bibliografía.....	112

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático	37
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre procesos utilizados en Latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos.	38
Tabla 3. Palabras clave para determinar la relevancia de las publicaciones sobre procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos	39
Tabla 4. Tecnologías utilizadas en países de Latinoamerica.....	43
Tabla 5. Preguntas orientadoras para la búsqueda de publicaciones sobre los impactos ambientales generados por manejos de residuos solidos en rellenos sanitarios	55
Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre de los impactos ambientales generados por manejos de residuos solidos en rellenos sanitarios	56
Tabla 7. Palabras clave para la identificación de estudios sobre los impactos ambientales generados por manejos de residuos solidos en rellenos sanitarios.	57
Tabla 8. Matriz de impactos ambientales en rellenos sanitarios más representativos por países	60
Tabla 9. Registro de toneladas dispuestas en el relleno sanitario Bucheli Tumaco	77
Tabla 10. Preguntas orientadoras para el mapeo sistémico de tecnologías aplicadas	81
Tabla 11. Criterios de exclusión e inclusión de publicaciones sobre alternativas tecnológicas	82
Tabla 12. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes	82
Tabla 13. Rendimiento en peso de la producción de compost.	105

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Número de publicaciones encontradas según bases de datos.....	40
Figura 2. Distribución de estudios según año de publicación.	41
Figura 3. Distribución de estudios relevantes según países.....	41
Figura 4. Plan de contingencia en relleno sanitario de Bucheli del municipio de Tumaco.	54
Figura 5. Estudio sobre los impactos ambientales generados por manejo de residuos sólidos en rellenos sanitarios	57
Figura 6. Distribución de publicaciones sobre impactos ambientales generados por manejos de residuos solidos en rellenos sanitarios.	58
Figura 7. Distribución de las publicaciones relevantes por país.....	59
Figura 8. Relleno sanitario La Glorita	72
Figura 9. Manejo de residuos sólidos en el relleno sanitario Bucheli	73
Figura 10. Laguna de homogenización en el relleno sanitario Buchelli	74
Figura 11. Tanque de oxidación en el relleno sanitario Buchelli	75
Figura 12. Vertimiento en relleno sanitario Bucheli	76
Figura 13. Disposición final de los residuos sólidos en relleno sanitario Bucheli.	77
Figura 14. Celda de Operación Relleno Sanitario de Bucheli en el municipio de Tumaco Nariño.	78
Figura 15. Estudios sobre alternativas tecnológicas.....	83
Figura 16. Publicaciones sobre alternativas tecnológicas	84
Figura 17. Distribución de publicaciones sobre alternativas tecnológicas.....	84
Figura 18. Sistema de compactación RSM.....	86
Figura 19. Sistema de compactación de RSM.....	87
Figura 20. Proceso de lombricultivo	88
Figura 21. Esquema del equipo necesario para llevar a cabo la Termólisis	89
Figura 22. Proceso de Vermicompostaje.....	92
Figura 23. Lodos activados.....	93
Figura 24. Biodigestor rural.....	94
Figura 25. Ejemplo de procesos de la biodigestión.....	95

Figura 26. Instalación de valoración energética	96
Figura 27. Etapa mesófila.....	98
Figura 28. Etapa termofílica.	99
Figura 29. Etapa de enfriamiento	99
Figura 30. Etapa de maduración	100
Figura 31. Comportamiento de la temperatura.....	100
Figura 32. Proceso de volteo	101
Figura 33. Aprovechamiento de residuos	103

Resumen

En el presente documento se describen los resultados del proceso de investigación cuyo objetivo fue analizar las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales. Se apoya en bases teóricas para el análisis de las tecnologías que se pueden emplear para el manejo adecuado de los residuos orgánicos en los lugares de disposición final de residuos sólidos. La metodología es de tipo descriptiva, apoyada en la revisión documental de antecedentes investigativos sobre tecnologías como el compostaje, el lombricultivo y la biodigestión que contribuyan a la correcta gestión de los residuos sólidos ya que se ha convertido en un argumento que cada vez toma mayor escenario en los temas ambientales, en los programas y políticas públicas y en el bienestar de todas las personas, respeto y conservación de la naturaleza y la sostenibilidad ambiental.

Lo anterior, también está muy ligado con otro tema de especial relevancia en la actualidad, tecnologías para la adecuada reutilización, en productos como abonos, placas biodigestoras, compostajes, cultivos con lombricultora, por mencionar algunos. De acuerdo con lo planteado en el Manual de compostaje elaborado por la FAO, este proceso consiste en la transformación natural de los residuos orgánicos mediante su descomposición. Esta transformación ocurre gracias a la acción conjunta de diversos microorganismos, cuya actividad se potencia al mantener ciertas condiciones controladas. Como resultado, se obtiene un material que mejora la estructura del suelo, sus componentes químicos y su dinámica biológica [1].

Se concluye que en la actualidad las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos son viables y sostenibles para la gestión de residuos orgánicos, ya que permiten la reducción de la cantidad de residuos, la generación de productos valiosos y la minimización de impactos ambientales.

Palabras clave: gestión de componente, impactos ambientales, compostaje, lombricultivo, biodigestor y residuos sólidos.

Abstract

This document describes the results of a research project aimed at analyzing the technologies used to manage the organic component of compacted solid waste in municipal landfills. It is based on theoretical foundations for the analysis of technologies that can be used for the proper management of organic waste at solid waste disposal sites. The methodology is mixed and descriptive, supported by a documentary review of research backgrounds on technologies such as composting, vermiculture, and biodigestion that contribute to the development of the ecosystem. to the proper management of solid waste, as it has become an issue that is increasingly taking center stage in environmental issues, in public programs and policies, and in the well-being of all people, respect and conservation of nature, and environmental sustainability. The above is also closely linked to another topic of special relevance today: technologies for proper reuse in products such as fertilizers, biodigester plates, composting, and worm farming, to name a few. According to the 'Composting Manual' of the United Nations Food and Agriculture Organization (UNFDA), According to the Food and Agriculture Organization (FAO), composting is the natural process of putrefaction or decomposition of organic matter. The biodegradation process occurs through the interaction of microorganisms, which are stimulated by controlled conditions and thus can provide various benefits to the soil by improving its physical and chemical properties and biological activity.

It is concluded that the technologies currently used for managing the organic component of solid waste are viable and sustainable, as they allow for reducing the amount of waste, generating valuable products, and minimizing environmental impacts.

Keywords: component management, environmental impacts, composting, vermiculture, biodigestion y residuos organicos

Introducción

El mal manejo de los residuos sólidos viene provocando graves problemas ambientales, específicamente sobre los componentes agua, suelo y aire, además de afectaciones a la salud de las personas, incluyendo la propagación de enfermedades y la degradación de los ecosistemas, todo esto es producto de las actividades diarias de distintas fuentes de origen, como los hogares, los comercios, las industrias, los trabajos agrícolas, los procesos de alimentos y transformación de los productos de consumo, así como de residuos originados de prácticas, profesionales, estéticas, entre otros, además los residuos que se generan de la construcción y la demolición de obras públicas y civiles. [2]

El tratamiento de los residuos sólidos representa uno de los retos ambientales más significativos para los municipios, ya que estos desechos pueden facilitar la proliferación de microorganismos que ponen en riesgo la salud humana. La constante acumulación de este tipo de residuos implica una amenaza seria tanto para el entorno natural como para el bienestar de la población, por lo que resulta urgente implementar acciones orientadas a enfrentar este problema de salud pública mediante una adecuada gestión y disposición final. [3]

Por lo anterior, cabe destacar que, a pesar de dichas afectaciones, actualmente existen tecnologías amigables con el medio ambiente, permitiendo a las industrias desarrollar sus actividades sin ningún inconveniente y al mismo tiempo les permite realizar prácticas que ayudan al manejo adecuado de los residuos orgánicos en los lugares de disposición final de residuos sólidos.

Debido a ello, esta investigación pretende analizar las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.

Para el desarrollo del presente documento, se describe a continuación siete apartados que aportan de manera significativa para el presente análisis.

El segundo corresponde a los aspectos que describen el problema, el cual parte de considerar el análisis de las tecnologías que se están empleando en el manejo de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios. Se complementa con los objetivos específicos consistentes en identificar los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos en mención, evaluar los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánico. Definir alternativas tecnológicas adecuadas aplicadas a un caso en particular. Concluyendo con la justificación desarrollada teniendo en cuenta aspectos económicos, técnicos y ambientales.

Para el segundo apartado, se describen la base que tiene que ver con conceptos y teoría, presentado los antecedentes en temas de tecnología de disposición, así como aspectos relacionados con componente orgánico disposición final tecnologías para el adecuado aprovechamiento de los residuos sólidos.

El tercer apartado se desarrolla el paso a paso de la metodología empleada para el presente documento, el cual se desarrolló mediante un enfoque mixto, lo que significa que se analizaron datos cualitativos y cuantitativos, que resultaron de la implementación técnica de la revisión documental de antecedentes sobre el análisis de las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios a nivel nacional e internacional.

En el cuarto apartado se presentan los resultados del primero objetivo, los cuales indican que los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico ha prevalecido el manejo de los residuos bajo el esquema de “recolección y disposición

final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos, así como la disposición final sanitaria y ambientalmente.

En el quinto, se describen los resultados del segundo objetivo, en donde se Evalúan los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en rellenos sanitarios municipales. En este apartado se identifican los posibles impactos ambientales generados por el proceso de manejo de residuos sólidos como la contaminación del aire, agua, generación de olores entre otros.

En el sexto, Se obtiene diferentes fuentes para definir una alternativa tecnológica adecuada aplicada a un caso en particular. En este apartado se toma un caso como alternativa para aplicar la tecnología del compostaje en la zona rural en el relleno sanitario de Bucheli de san Andrés de Tumaco Nariño con el objeto de reducir la cantidad de residuos enviados a dicho relleno permitiendo producir fertilizante natural rico en nutrientes que pueden ser utilizados en la agricultura de la comunidad.

Y finalmente, en el séptimo apartado se plantean algunas conclusiones que permiten entender que hay diversas tecnologías para emplear en la gestion del componente organicos en los rellenos sanitarios como son el compostaje, la lombricultura y el biodigestor, el uso adecuado de estas tecnologias es fundamental para reducir la gestion de residuos porque permiten disminuir los impactos ambientales para promover la sostenibilidad ya que contribuyen a la conservacion del ecosistema.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

A nivel global, el manejo de los residuos sólidos representa un desafío creciente para las zonas urbanas. Diversos factores, como el aumento de la población, la concentración humana en ciudades, el funcionamiento poco eficiente del sector industrial y comercial, los cambios en los hábitos de consumo y la mejora en las condiciones de vida, han contribuido significativamente al incremento en la producción de desechos tanto en áreas urbanas como rurales [4].

Sin embargo, la adopción global de las tecnologías depende de factores como el acceso a financiamiento, la educación ambiental y la infraestructura local [5]. Según, estudios realizados, en la actualidad se genera 2000 millones de toneladas de residuos sólidos en todo el mundo, en donde el 33% no se gestiona de la forma adecuada [6].

Debido a esto, se puede afirmar, según los estudios realizados que existen 28 países que sufren en la actualidad de congestión de residuos, debido a la falta de adaptación e implantación de las nuevas tecnologías, esto lleva a un manejo inadecuado de los residuos sólidos trayendo consecuencias de contaminación y afectaciones al medio ambiente y a la salud humana [7].

En Colombia, el manejo de residuos sólidos es un desafío importante, en los últimos años se han venido implementando diversas tecnologías para mejorar su gestión, enfocándose en la reducción, reutilización y reciclaje. Se viene implementando tecnologías modernas como plantas de separación y clasificación automatizadas, que utilizan equipos para clasificar residuos reciclables, como plásticos, papel, vidrio y metales. [8]

De acuerdo con datos de la Superintendencia de Servicios Públicos en Colombia señala que para el 2020 se disponían diariamente, un aproximado de 32.580 toneladas/día de RS lo que

representa un gran desafío para la gestión de residuos en el país, esto se traduce en alrededor de 12 millones de toneladas de residuos (domésticos, comerciales e industriales) al año [9]. La falta de implementación, planificación y financiación de tecnologías adecuadas y oportunas ha determinado que el estado actual de la situación alcance unos niveles críticos de contaminación del suelo, agua y el ambiente [10].

Un caso específico en nuestro país es el del relleno sanitario de Bucheli del municipio de Tumaco en el departamento de Nariño, el cual como muchos otros no cuenta con las tecnologías eficientes y adecuadas para el tratamiento de los residuos sólidos que llegan a las instalaciones, estos son mezclados y ubicados en un mismo lugar sin separar, ocasionando menos vida útil del relleno sanitario [11].

Por lo tanto, todo el componente orgánico que llega al relleno sanitario es condensado y compactado en el proceso del relleno generando grandes cantidades de lixiviados con efectos negativos para el medio ambiente, permitiendo contaminación en los recursos naturales (agua, suelo y aire) y afectación en la salud humana. (12)

Según el informe del Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCCCP 2008), el municipio de Tumaco genera 52 toneladas de basuras por día, donde aproximadamente el 52% de esta va parar al mar, registrándose un deterioro alarmante del ecosistema. Así mismo, se puede afirmar que la población en la actualidad genera 0,75 kg de residuos per cápita, donde el 35% - 40% son residuos sólidos que son los que están en el plan de recolección municipal, un 50% son residuos líquidos domiciliarios que no tienen ningún tratamiento en su disposición final y son vertidos directamente al mar [13].

De acuerdo a la información antes mencionada, todo el componente orgánico que llega a este relleno sanitario es procesado con tecnologías no apropiadas, el residuo sólido es condensado

y compactado en el proceso del relleno sin clasificar y con un componente alto de materiales orgánicos de forma homogénea. [14].

Por lo tanto, se debe considerar otras alternativas tecnológicas como biodigestores que permitan aprovechar los residuos orgánicos y generar energía o compost, que pueden emplearse de forma más eficiente para la gestión de residuos sólidos orgánicos para minimizar el impacto ambiental que vienen ocasionando en el proceso de descomposición en el relleno sanitario [15], Por consiguiente, los argumentos antes expuestos, la propuesta investigativa gira en torno a darle respuesta al interrogante general.

1.2 Formulación del problema

¿Cuáles son las tecnologías que se emplean con mayor frecuencia para el manejo sostenible y racional del componente orgánico en los centros de disposición final de los residuos sólidos y como aplicarlas en el Relleno Sanitario Bucheli del municipio de Tumaco – Nariño?

1.3. Justificación

Al hacer referencia de las tecnologías aplicables a la gestión del componente orgánico acopiado en las instalaciones de disposición final de residuos sólidos, se entiende que propenden reducir la cantidad de residuos orgánicos, implementando tecnologías que permitan recuperar los recursos naturales lo cual puede generar un mejor aprovechamiento, como son: el compostaje, la producción de abono orgánico, la lombricultura, las placas biodigestoras, entre otras, procesos

que aminoran los impactos ambientales negativos y que le dan un aprovechamiento racional y sostenible con los ecosistemas.[16]

En ese sentido, el estudio relacionado en el estado del analisis de las tecnologías aplicables a la gestion del componente organico describiéndose en la presente monografía donde se justifican cuatro perspectivas fundamentales.

1.3.1. Social

El uso de tecnologías aplicadas al manejo de residuos sólidos contribuye significativamente a reducir los efectos negativos tanto ambientales como sociales, especialmente en lo relacionado con su disposición final, aspecto que forma parte de las responsabilidades de la gestión ambiental. En este contexto, el municipio de Tumaco enfrenta una grave crisis sanitaria, originada por la precariedad en servicios públicos esenciales como el acceso al agua potable, la recolección y el adecuado tratamiento de los residuos sólidos, así como la ausencia de un sistema de alcantarillado. Estas deficiencias representan serios riesgos para la salud pública y afectan directamente las condiciones de vida de sus habitantes [17].

1.3.2. Ambiental

Este estudio encuentra su justificación en el aporte que brinda sobre alternativas tecnológicas aplicables al manejo, tratamiento y disposición de los residuos sólidos, como lo son el uso de biodigestores, la lombricultura y el compostaje, prácticas que generan beneficios ambientales al contribuir a la reducción del impacto negativo asociado a la disposición final de

dichos residuos. En la actualidad, existe un relleno sanitario ubicado en la vereda Bucheli, junto a la vía que conecta Tumaco con Pasto, el cual, sin embargo, presenta características propias de un botadero a cielo abierto, ya que no fue desarrollado ni planificado conforme a criterios técnicos adecuados. Según datos proporcionados por el gerente de Acuamira, se estima que diariamente ingresan al sitio cerca de 90 toneladas de residuos sólidos, de las cuales el 82 % corresponde a materia orgánica y el 18 % restante a residuos inorgánicos [18].

Por tal razón es importante implementar nuevas tecnologías que permitan mejorar las condiciones de vida de esta comunidad generando impacto ambiental en la calidad del aire, del agua y en la salud humana.

1.3.3. Académica

El presente estudio se destaca como pertinente, ya que por medio del análisis realizado sobre el manejo de residuos sólidos y las investigaciones que tienen que ver con la implementación de las tecnologías utilizadas para gestionar el componente orgánico de los residuos sólidos compactados en los rellenos sanitarios de los municipios, en la descripción se aportaron elementos relevantes que muestran a partir de los estudios realizados la evidencia sobre la efectividad de dichas tecnologías y procesos, insumos importantes para el campo investigativo y académico, que pueden ser necesarias para el contexto local, regional e internacional en temas relacionados con rellenos sanitarios y manejo de residuos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.
- Evaluar los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en rellenos sanitarios municipales.
- Definir alternativas tecnológicas adecuadas aplicadas a un caso en particular.

2. Estado del arte y bases teóricas

Con el fin de realizar un acercamiento al tema sobre el análisis de las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en los rellenos sanitarios municipales, se precisa como primera media, indagar por los antecedentes investigativos o estado del arte.

2.1. Estado del arte

Las tecnologías para la gestión del componente orgánico, como el compostaje, los biodigestores y la lombricultura, permiten transformar residuos orgánicos en recursos valiosos como abono y energía, reduciendo el impacto ambiental y promoviendo la sostenibilidad. En América Latina y El Caribe ha prevalecido el manejo de los residuos con intención de implementar soluciones innovadoras para reducir, disponer y aprovechar de manera adecuada, contribuyendo de manera significativa al medio ambiente. [19]

La elección del sistema de tratamiento más adecuado depende directamente de la naturaleza y composición del lixiviado generado. Para lograr un tratamiento biológico efectivo, es esencial analizar su capacidad de ser degradado mediante procesos biológicos. En los casos donde las plantas de tratamiento presentan baja eficiencia, se hace necesario aplicar soluciones combinadas que aumenten su rendimiento y aseguren mejores resultados [20].

De acuerdo a los datos de la ONU en el mundo los seres humanos generan más de 2.000 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos cada año, de los cuales el 45% se gestiona de manera inadecuada. Esta cifra aumentara si se sigue la misma tendencia actual, actualmente, 28 países enfrentan un riesgo elevado de colapso en el manejo de residuos, lo cual podría

desencadenar una manipulación deficiente de los desechos y generar impactos negativos sobre la salud humana y el entorno. Entre estos países se encuentran China, México, India y Uzbekistán, todos ellos importadores significativos de residuos peligrosos [21].

El agravante de estas cifras, radica en que la mayoría de los RS no se les hace una clasificación adecuada en la fuente de origen [22].

En términos de generación per cápita, América Latina produce alrededor de 1 kilogramo de residuos por habitante al día, una cifra inferior a la de varias naciones pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), pero superior en comparación con otras regiones del mundo [23].

A nivel nacional, se encontró la guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura, manual realizado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) del año 2018 [24], en donde se estipula, que aproximadamente 6.300 toneladas de residuos sólidos son compactados en el relleno sanitario de doña Juana de Bogotá, y que todo este tonelaje, el 53.22% corresponden a residuos orgánicos que son desaprovechados al llegar mezclados con el resto de residuos y sepultados en el Relleno, estos se podrían aprovechar mediante tecnologías como el compostaje, el lombricultivo y la biodigestión (Unidad Administrativa Especial de Servicios Público [24].

Según el informe del, Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCCP 2008), el caso de Tumaco, se estima una producción diaria por persona cercana a los 0,75 kilogramos de residuos, de los cuales entre el 35 % y el 40 % corresponden a residuos sólidos, mientras que el 50 % son vertimientos líquidos domésticos que terminan directamente en el mar. Menos de la mitad de estos desechos están siendo recogidos por el sistema municipal, lo que ha contribuido al deterioro sostenido de los ecosistemas locales. Esta situación se ve agravada por la ocupación

desordenada del territorio urbano, la ausencia de una adecuada planificación y las deficiencias estructurales en servicios públicos fundamentales como el acceso al agua potable, el sistema de alcantarillado y una recolección de residuos eficiente [25].

Esta investigación presenta bases teóricas para el análisis de las tecnologías que se pueden emplear para el manejo adecuado de los residuos orgánicos en los lugares de disposición final, toda vez que presenta un recorrido bibliográfico y comparativo en cuanto a alternativas empleadas en diferentes ciudades de Colombia.

Dentro de la revisión de antecedentes nacionales, también se logró encontrar la investigación “Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite (2020)”, los resultados de este trabajo, fueron publicados por la revista de Tecnología en Marcha [26], los autores destacan que uno de los principales contaminantes que van a los vertederos, son los residuos de grasas de aceites.

Los resultados muestran que, en rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto, aún podemos encontrar materiales como plástico, cartón, metales y residuos orgánicos que poseen valores remanentes; provocando efectos nocivos y riesgos a la salud. [27]

Los residuos orgánicos, son los que con mayor volumen se depositan en los rellenos sanitarios, lo cual disminuye la capacidad y vida útil de estos para la disposición final de los residuos sólidos en general y además, son los causantes de la generación de gases de efecto invernadero, resultados que llevan a priorizar, la necesidad de alternativas para la gestión del componente orgánico, mediante la producción de los abonos orgánicos, el compost, la recuperación energética del residuo, entre otros. [28]

Manejo de residuos sólidos

La gestión de los residuos sólidos en el relleno sanitario de Bucheli se orienta principalmente a minimizar los impactos ambientales. Para ello, se han implementado varias acciones clave, entre las cuales se destacan: el pesaje y registro de los residuos al ingreso, su posterior descarga, y el uso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el cual contempla la inversión de al menos el 50 % de los ingresos generados por la comercialización de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) en proyectos sociales que beneficien directamente a la comunidad donde opera el generador de dichas emisiones.

El Decreto 2981 de 2013 establece que el servicio público de aseo comprende la recolección municipal de residuos —en su mayoría sólidos—, y también se extiende a actividades complementarias como su transporte, aprovechamiento y disposición final. Por su parte, la Resolución 0330 de 2017 determina las condiciones técnicas que deben cumplirse en todas las fases —desde el diseño hasta la operación, mantenimiento y rehabilitación— de las infraestructuras destinadas a los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. En este contexto, el manejo de los residuos incluye procesos como la descarga en plataformas, su separación, compactación, aplicación de coberturas intermedias y el manejo adecuado de los sistemas de drenaje para lixiviados [30].

Esta monografía presenta aportes de tipo conceptual y de datos sobre nuevas técnicas y tecnologías para el debido aprovechamiento de residuos biodegradables y como ajustar el marco normativo ambiental y de PGIRS actuales para estos propósitos de aprovechamiento de los residuos orgánicos.

2.2. Bases teóricas

Los residuos, son conceptualmente entendidos como los desechos en estado sólido, líquido o gaseoso, ya sea que se encuentren de forma aislada o mezclados con otros residuos, que se originan o son el resultado o sobrante de un de extracción natural, de la manufactura o procesos mecánico de transformación, de la fabricación, o del consumo, que se desechan [31].

Como **residuo sólido**, por su parte, se entienden a todos aquellos desechos que se encuentran en material duro o palpable y que resultan de distintas fuentes de origen como los hogares, los comercios, las industrias, los trabajos agrícolas y de jardinería, los procesos de alimentos y transformación de los productos de consumo, así como de residuos originados de prácticas profesionales, estéticas y profesionales entre, otros, y además los residuos que se generan de la construcción y la demolición de obras públicas y civiles. [32]

Por su parte, se entiende por **residuos orgánicos**, aquellos desechos que quedan de la elaboración y preparación de comidas, de la actividad de la poda y corte de céspedes y jardines, de la fabricación de muebles y artesanías con insumos maderables y vegetales. Es decir, se conocen como aquellos residuos que se descomponen gracias a la acción de los desintegradores de la naturaleza, o que, en pocas palabras, son biodegradables, por efecto de su descomposición natural [32].

Sumado a lo anterior y para efectos del presente componente teórico y conceptual, debe agregarse que la **disposición final**, es la conducción, depósito y aislamiento de los residuos, especialmente los que no son clasificados como aprovechables en sitios destinados.

Tecnologías para la adecuada reutilización, en productos como abonos, placas biodigestoras, compostajes, cultivos con lombricultura, por mencionar algunos. Según el Manual de Compostaje de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el

compostaje consiste en un proceso natural de descomposición de la materia orgánica. Esta biodegradación ocurre gracias a la acción de microorganismos, los cuales actúan en condiciones controladas, permitiendo así que el resultado final beneficie al suelo al mejorar sus propiedades físicas, químicas y su actividad biológica [33].

3. Metodología

Es una investigación de tipo descriptivo mediante la implementación de la revisión documental o bibliográfica como técnica de recolección de información predominante.

3.1. El enfoque mixto

La combinación de datos cuantitativos y cualitativos permite abordar una temática o problema de investigación desde una perspectiva más integral. Esto se debe a que la precisión y objetividad de las cifras se ve enriquecida con las percepciones, interpretaciones y opiniones de los actores involucrados, ya sean investigadores o participantes del estudio, lo que proporciona una comprensión más profunda del fenómeno analizado [35].

En el caso específico del estudio sobre los métodos utilizados en América Latina para el tratamiento y gestión del componente orgánico de los residuos sólidos en rellenos sanitarios municipales, se hace uso de estadísticas obtenidas de investigaciones tanto nacionales como internacionales. Esta información cuantitativa se complementa con enfoques interpretativos que permiten ampliar la comprensión de los resultados, sirviendo como base informativa para futuras iniciativas o investigaciones aplicadas [34].

3.2. Investigación descriptiva

Dado que este estudio no tiene un enfoque experimental, se enmarca dentro de una investigación de tipo descriptivo, orientada a revisar el estado actual del conocimiento sobre las tecnologías empleadas en el tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos

dispuestos en rellenos sanitarios urbanos. El análisis se limita a la recopilación y exposición de resultados documentados en diferentes fuentes, sin que se haya realizado una intervención directa sobre la problemática. En este sentido, el propósito del estudio es sistematizar la información existente y ofrecer un panorama general que permita entender las prácticas tecnológicas implementadas, sin ponerlas a prueba mediante un proyecto práctico o aplicado [34] [35].

3.3. Técnica de recolección de información

En vista que se realiza un análisis descriptivo de investigaciones sobre de las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales. nacional e internacional. En ese sentido, se implementa el mapeo sistemático, consistente en una búsqueda, síntesis y análisis de publicaciones, tales como artículos científicos de revistas indexadas, tesis de los niveles de maestría y doctorado, así como de informes y libros disponibles en repositorios físicos y digitales para obtener información pertinente con las categorías y/o variables relacionadas [1] [34].

En tal sentido, se lleva a cabo un proceso de síntesis de información de los diferentes documentos, con lo cual es posible identificar en primer lugar las tecnologías utilizadas para la gestión del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.

3.4 Procedimiento

A partir de los objetivos planteados, el desarrollo del estudio se realizará en tres fases con sus respectivas actividades como se describen a continuación.

3.4.1 Fase I. Identificación de los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.

La implementación de esta fase conlleva el desarrollo de cinco pasos que describe la propuesta de Petersen [34] para una revisión sistemática:

- **Determinación de preguntas**

Las preguntas se realizaron a partir de la identificación del tema de interés acerca del manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados, así como rellenos sanitarios en Latinoamérica.

- **Realización de búsqueda**

Se realizó la consulta de la literatura de las bases de datos como de acceso libre, tales como Dialnet, Redalyc, Reserachgate y Scielo, además de Semantic Scholar, IEEE, ScienceDirect, que son de acceso exclusivo, a las que se suman otras fuentes representadas en repositorios digitales de universidades, organismos nacionales e internacionales y centros de investigación en materia ambiental.

- **Revisión de documentos:** A partir de la consulta, se hace la revisión pertinente en la lectura para identificar los que son relevantes para la presente investigación.

- **Revisión de resúmenes y palabras clave:** La revisión de las publicaciones permitió la clasificación conforme a las variables relevantes del estudio.
- **Extracción de datos:** A partir de la revisión y clasificación se procedió a extraer los datos, realizando la síntesis de información con la que se da respuesta a las preguntas que se han planteado.

Los resultados de esta fase son los que se presentan en el capítulo 4, en el que se describe acerca de los manejos y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios en Latinoamérica.

3.4.2. Fase II. Evaluación de los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en relleno sanitario de Bucheli del municipio de Tumaco, Nariño.

Para determinar cuáles son los impactos ambientales generados por falta de implementación de tecnologías para el manejo del componente orgánico se implementa el método de mapeo sistemático siguiendo las mismas etapas de Petersen [34] descritas en la fase anterior:

- **Formulación de preguntas:** Las preguntas se realizaron con base en el tema relacionado con los impactos ambientales generados por falta de implementación de tecnologías para el manejo de componente orgánico.
- **Búsqueda de antecedentes:** Se realizó la revisión de bases de datos de acceso libre (Dialnet, Redalyc, Researchgate, Scielo y google académico), de acceso exclusivo (IEEE, Semantic Scholar y ScienceDirect) y otras fuentes en las que se agruparon los repositorios digitales de universidades en los que están disponibles tesis de maestría y doctorado,

además de informes de centros de investigación y otras organizaciones que han realizado estudios de impactos ambientales generados por falta de implementación de tecnologías apropiadas para el manejo del componente orgánico que llegan a los sitios de disposición final de residuos sólidos. Se trató de la búsqueda de trabajos realizados en el ámbito nacional e internacional al respecto.

- **Revisión de publicaciones:** Se realizó la respectiva revisión de las publicaciones encontradas lo cual permitió definir cuáles son las pertinentes para la presente investigación.
- **Revisión de resúmenes y palabras clave:** A partir de los parámetros específicos del tema de estudio se clasificaron las publicaciones de acuerdo con cada variable o categoría relevante.
- **Extracción de datos:** Se describieron los hallazgos relevantes de las investigaciones sobre las tecnologías limpias identificadas.

3.4.3. Fase III. Definir una alternativa tecnológica adecuada aplicada a un caso en particular.

En esta fase se identifican aquellas categorías y variables que emergen de los estudios más relevantes sobre alternativas tecnológicas para el tratamiento racional y sostenible del componente orgánico de los residuos sólidos que llegan al Relleno Sanitario Bucheli del municipio de Tumaco en el departamento de Nariño.

- ✓ Identificación de categorías y/o variables emergentes: Para identificar las categorías se identificaron los aspectos característicos comunes entre los antecedentes investigativos consultados a raíz de alternativas tecnológicas para el tratamiento racional y sostenible del componente orgánico de los residuos sólidos.
- ✓ Discusión comparativa: Se realizó la confrontación de hallazgos relacionados con alternativas tecnológicas para el tratamiento racional y sostenible del componente orgánico de los residuos sólidos.
- Análisis final: A partir de todos los datos analizados se realizó las consideraciones finales teniendo en cuenta los análisis comparativos de hallazgos de los antecedentes en los ámbitos nacional e internacional.
- ✓ Elaboración de conclusiones y recomendaciones: Se realizaron a partir de los aspectos relevantes de cada objetivo. Además, se formulan sugerencias para el de alternativas tecnológicas para el tratamiento racional y sostenible del componente orgánico de los residuos sólidos.

4. Resultados y análisis

4.1 Identificación de los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios municipales.

Actualmente en Latinoamérica se vienen implementando diferentes procesos para el tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios. Para ello, siguiendo la propuesta de Petersen [34] [35] para un mapeo sistemático descrito en el numeral 3.4.1, los resultados descritos a continuación son producto de las siguientes preguntas orientadoras:

Tabla 1. Preguntas orientadoras para el mapeo sistemático

Preguntas orientadoras	Motivación
1. ¿Qué estudios existen sobre los procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos?	Determinar el número de publicaciones acerca de los procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos,
2. ¿Cómo se distribuyen anualmente los estudios durante el periodo 2010 – 2025	Identificar la frecuencia de publicación durante el periodo 2010 – 2025
3. ¿En qué países se han realizado los estudios?	Determinar los países de origen de los estudios descritos.
4. ¿Qué hallazgos presentan los estudios en cuanto procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos?	Describir los procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos.

Fuente: Elaboración propia

A partir de las preguntas orientadoras, se tuvo en cuenta las bases de datos en el proceso de búsqueda de las diferentes fuentes de acceso gratuito, Redalyc, Dialnet, Reserchgate, Google academico y Scielo, así mismo como ScienceDirect y Semantic Scholar y otras fuentes. Se asumieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión para las búsquedas realizadas.

Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos.

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre procesos utilizados en latinoamerica para el manejo y tratamiento de los residuos solidos	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés.
Publicaciones desde al año 2010 a 2025	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos o completos no disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Estudios de acceso al menos a resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los términos de exclusión e inclusión, se consideraron las palabras claves, en español y en inglés para así mismo identificar las publicaciones relevantes para dar respuesta a las preguntas orientadoras. Para ello, la Tabla 3 describe las que se utilizaron para efectos de hacer filtros en las bases de datos seleccionadas.

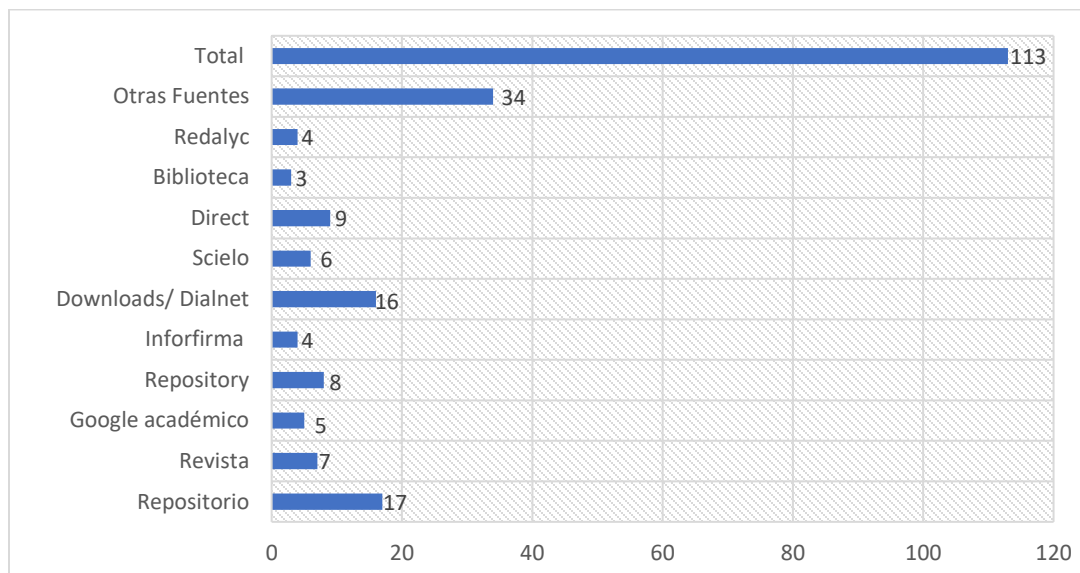
Tabla 3. Palabras clave para determinar la relevancia de las publicaciones sobre procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos.

Palabras clave	Keywords
Reutilizacion	Reuse
Vertederos	Landfills
Compostajes	Composting

Fuente: Elaboración propia

A partir de la implementación de los lineamientos para el mapeo sistemático, se realizan las graficas correspondientes para dar respuesta a las preguntas orientadoras con los criterios de inclusión del presente estudio.

Figura 1. Número de publicaciones encontradas según bases de datos



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 1, es posible dar respuesta a la primera pregunta, de los estudios que existen sobre los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos, como resultado, se obtuvieron 113 publicaciones primarias y 75 relevantes de las cuales se destacan las fuentes utilizadas, Repositorio con 17 publicaciones es la que más aporta al estudio, seguida de Dialnet 16, Direct con 9, Revistas 7, Redalyc 4, Repository 8 y de otras fuentes 12, como se muestra en la figura 1.

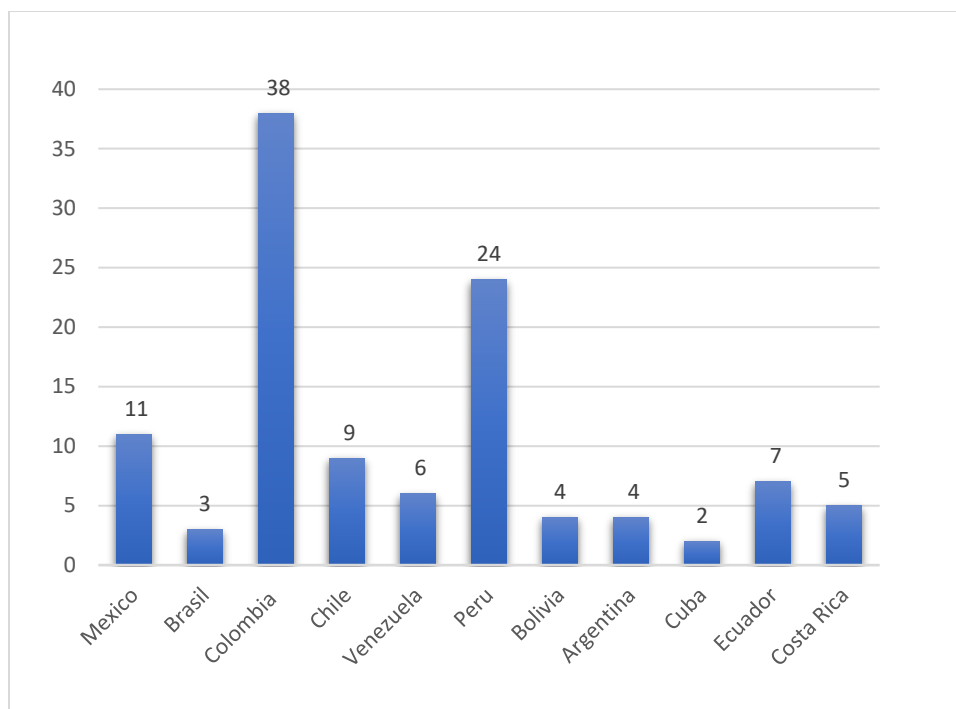
Figura 2. Distribución de estudios según año de publicación.



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la figura 2, la cual responde a la segunda pregunta sobre la distribución por año de los estudios encontrados en el periodo 2010-2025 de los procesos utilizados en latinoamérica para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos, se encontró que en los años de publicaciones mayores sobre el tema es el año 2019 con 10 publicaciones y el año 2021 con 14 publicaciones sobre el tema de estudio.

Figura 3. Distribución de estudios relevantes según países



Fuente: Elaboración propia

La figura 3, responde a la tercera pregunta, que se refiere a los países donde se han realizado los estudios de la presente investigación, Colombia con 38 estudios, Perú 24, México 11, Chile 9, Ecuador 7, Venezuela 6, Costa Rica 5, Bolivia y Argentina 4, Brasil 3 y Cuba 2, para un total de 113 estudios publicados.

Por lo anterior, se puede destacar que en Latinoamérica se viene trabajando e implementando procesos para el tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos compactados en rellenos sanitarios, buscando alternativas que ayuden a minimizar el impacto causado por la mala disposición de residuos sólidos.

4.1.1. Procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento de los residuos sólidos.

A lo largo de los últimos años, la forma en que se recogen y manejan los residuos ha mostrado avances graduales; sin embargo, resulta preocupante que más de 40 millones de personas en América Latina todavía no tengan acceso a un servicio esencial como la recolección de residuos [35]. En diferentes sitios de disposición, ya sean rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto, continúan encontrándose materiales con potencial de reutilización como plásticos, cartón, metales y desechos orgánicos, los cuales pueden generar impactos negativos y riesgos para la salud pública. El manejo integral de los residuos sólidos incluye varias fases: desde su generación, pasando por el almacenamiento, recolección, transporte y transferencia, hasta llegar al tratamiento y disposición final [36].

Las etapas que constituyen el manejo de residuos sólidos son: generación, almacenamiento, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final [37].

Tabla 4. Tecnologías utilizadas en países de Latinoamérica

País		Tecnología Aplicada	Eficiencia en reducción de materia orgánica
México	Compostaje	Reactores cerrados con control de temperatura y humedad	40% - 60%
		Volteo mecánico	10% - 60%
		Pilas estáticas con aireación forzada	85% - 91%
	Producción de biogás para energía	Digestores anaerobios + generadores de electricidad	25% - 40%

	Biodigestión anaerobia	Biodigestores de tipo laguna cubierta, domos flexibles o tanques de flujo continuo	60% - 80%
	Digestión anaerobia seca	Reactor	30% - 40%
Bolivia	Compostaje	Pilas volteadas	
	Vermicompostaje	Lombrices californianas	
	Biodigestión anaerobia	Biodigestores	30% - 40%
Chile	Compostaje	Tambor rotatorio	
	Producción de biogás para energía	Digestores anaerobios	25% - 40%
	Digestión anaerobia	Biodigestores	30% - 40%
Perú	Compostaje	Compostadores mecánicos	
	Biodigestión anaerobia	Biodigestores	30% - 40%
	Vermicompostaje	lombrices (<i>Eisenia foetida</i>)	
Cuba	Compostaje	Composteras comunitarias	
	Biodigestión anaerobia	Biodigestores	30% - 40%
	Vermicompostaje	lombrices (<i>Eisenia foetida</i>)	
Colombia	Compostaje	Pilas o lechos estaticos aireados	40% - 60%
		Túneles de compostaje	10% - 60%
		Pilas estáticas con aireación forzada	85% - 91%
	Biodigestión anaerobia	Biodigestores de tipo laguna cubierta y flujo continuo	60% - 80%

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.1. Proceso utilizado en México: De acuerdo a las publicaciones analizadas, se puede afirmar que México es uno de los países de Latinoamérica que ha venido trabajando en el tema de residuos sólidos, avanzando en políticas públicas y tecnologías para el tratamiento de los residuos, en este país se genera aproximadamente 102.000 Ton/día de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de los cuales el 48% son residuos orgánicos [38].

En México, los principales procesos utilizados son la incineración, el vertimiento controlado, la pirolisis (Tratamiento térmico sin oxígeno para plásticos y llantas), la biometanización, Gasificación (Conversión térmica de residuos sólidos RDF).

En muchos municipios mexicanos la gestión de residuos sólidos se reduce a la recolección y su disposición final, el 9,1 % de los residuos generados es recolectado selectivamente [39]. Según Torres (2022), [40] en la política de México existe una preferencia en la reutilización y el reciclaje de residuos, puesto que esta recolección de materiales tiende a la reducción de costos, además de la urgencia de establecer operaciones automáticas en el proceso. Se propone la valorización energética como una vía complementaria a la recolección de desechos, puesto que el uso de rellenos sanitarios es una opción poco adecuada.

Así mismo, México viene trabajando en procesos y tecnologías para el tratamiento de residuos orgánicos, los cuales pueden alcanzar eficiencias del 30% hasta un 91% en la reducción de materia orgánica y producción de biogás como se muestra en la tabla 4.

- ✓ **Compostaje:** Se está realizando a nivel doméstico, industrial y comunitario. Existe una planta de compostaje llamada Bordo Poniente en Ciudad de México, considerada una de las más grandes de América Latina.

Pilas estáticas con aireación forzada: Es un método de compostaje en donde se utilizan ventiladores para airear la pila de material orgánico, la cual permite la descomposición de

manera más eficiente y rápida, proceso que no necesita volteo manual, se maneja para residuos a menor y mayor escala. [38].

Volteo mecánico: Es un proceso que se maneja en el compostaje, en donde se utiliza aireación y mezcla a la pila de compost utilizando maquinaria, este se denomina volteo mecánico, en donde se asegura la descomposición eficiente de los residuos orgánicos, se utiliza en procesos de compostaje a gran escala. [38].

Reactores cerrados con control de temperatura y humedad: Estos reactores se utilizan en el proceso del compostaje, controlando la temperatura y humedad, siendo un entorno donde se puede optimizar y acelerar la descomposición de la materia orgánica. Se puede decir que este tipo de sistema controlado permite obtener un compost de mayor calidad en menos tiempo. [38].

- ✓ **Producción de biogás para energía:** Se está realizando a nivel urbano e industrial, en la actualidad está siendo aplicado en el mercado de abastos de Guadalajara, Plantas de Ciudad de México y Querétaro. [38].

Digestor anaerobio (generador de electricidad): Es un proceso biológico que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, permitiendo la producción de biogás, esta mezcla de gases se utiliza para generar electricidad, lo cual se denomina importante ya que el aprovechamiento del biogás permite la producción de energía renovable. [38].

- ✓ **Biodigestión anaerobia:** Se está realizando a nivel agroindustrial y en zonas rurales, en la actualidad se está aplicando en programas de biodigestores en Jalisco, Chiapas y Oaxaca.

Los biodigestores tipo laguna cubierta, domos flexibles y tanques de flujo continuo:

Este tipo de sistemas están diseñados para la digestión anaeróbica de la materia orgánica, se aplican dependiendo las características y factores, produciendo fertilizantes líquidos y biogás (metano). [38].

Laguna cubierta, este tipo de proceso se realiza por medio de pozos excavados, los cuales se recubren con geomembranas que son materiales impermeables, esto para generar el espacio que se necesita para el almacenamiento de biogás. Se utilizan en granjas, para producir biofertilizante y biogás. Los domos flexibles, es un proceso donde a partir de la membrana se crea el espacio de almacenamiento para el biogás. Los tanques de flujo continuo, se utilizan en procesos a gran escala ya que la materia orgánica se introduce de manera continua, así el biogás se produce constantemente. [38].

- ✓ **Digestión anaerobia seca:** Se está realizando para el tratamiento de orgánicos en especial los que se componen de alta materia seca, el proceso consiste en un proceso biológico que descompone la materia orgánica, la cual se desarrolla en ausencia de oxígeno, permite el tratamiento de residuos con menor humedad. [38].

4.1.1.2. Proceso utilizado en Bolivia: Específicamente en la ciudad de Viacha, señala Ferronato et al. (2021), la gestión de residuos se desarrolla de manera muy pobre, las condiciones técnicas deficientes como la poca inversión de infraestructura y servicio, provoca repercusiones negativas en la población, la insatisfacción y la exposición a enfermedades son la principal consecuencia de esta gestión deficiente. [41]

En Bolivia existe un aprovechamiento del 80% de los residuos sólidos, de los cuales van a disposición final un 18,2% de residuos no reciclables, 1,8% de metales, 9% plásticos, 3% vidrio

y 6% papel, los residuos inorgánicos reciclables el 19,8% van a industrias de reciclaje y el 60% de residuos orgánicos reciclables van a plantas de compostaje [42]

Así mismo, se puede decir que el 77% de los municipios cuentan con un sitio para disposición final, de este porcentaje solo el 13% es destinado a rellenos sanitarios y el 87% va a parar a botaderos a cielo abierto [40].

En Bolivia se viene trabajando en procesos y tecnologías para el tratamiento de residuos orgánicos que son:

- ✓ Compostaje: Se está realizando a nivel domiciliario y comunitario, promovido por gobiernos municipales, existiendo plantas de compostaje con el sistema de Pilas volteadas. [40].
- ✓ Vermicompostaje: Es usado en pequeña escala en proyectos educativos y agrícolas, donde se utilizan las lombrices californianas para degradar los residuos orgánicos. [40].
- ✓ Digestión anaerobia: Se están adelantando pruebas piloto, en donde están utilizando biodigestores para generar biofertilizantes y biogás en el campo agrícola y ganadera. [40].

4.1.1.3. Proceso utilizado en Chile: En Chile, la generación per cápita es de 1,21 kg/hab/día, la cobertura de recolección es de 97,8 % y la recolección selectiva solo abarca el 10 %. La Comuna de Santiago produce anualmente 184,706 t/día y la tendencia va en ascenso, producto de la fuerte densificación de la comuna en la última década [43]. Existe poca información respecto a la gestión de residuos sólidos, al tratamiento, reciclado y eliminación de los materiales de desecho. [44].

En Chile se estan utilizando las siguientes tecnologías en el manejo de residuos orgánicos:

✓ **Compostaje**

Pilas estáticas aireadas: se utilizan ventiladores para airear la pila de material orgánico, la cual permite la descomposición de manera más eficiente y rápida utilizandose en los municipios y agroindustria. [45]

Compostaje en tambor rotatorio: Este método se utiliza para transformar los residuos orgánicos en abono, se realiza mediante un tambor que gira, en este proceso los residuos son mezclados y aireados permitiendo acelerar la descomposición, se está utilizando en las comunidades y escuelas. [45]

✓ **Producción de Biogás**

En este proceso se descomponen los residuos organicos como alimentos, estiércol por medio de microorganismos generando biogás. [45]

✓ **Digestión Anaeróbica**

Se utilizan biodigestores para generar biofertilizantes y biogás . [45]

4.1.1.4 Proceso utilizado en Perú: La generación per cápita es de 1,06 kg/hab/día, las prácticas de segregación en la fuente es una práctica poco habitual en la sociedad y muy reducida. Entre los materiales recuperables económicamente atractivos podemos encontrar papel y cartón, metales y plástico, esto debido a los patrones de consumo. [46].

El porcentaje de cobertura de recolección convencional es de 84%.[41]. Aún persiste el reciclaje informal a través de los recicladores ya sea individuales o agrupados; en algunos distritos de Lima como Villa El Salvador, Los Olivos y el Cercado del Callao de han implementado mecanismo para la recolección selectiva puerta a puerta [47].

Las tecnologías utilizadas en Perú para el tratamiento de residuos orgánicos son los siguientes:

- ✓ **Compostaje:** Se está utilizando a nivel municipal, domiciliario y en comunidades rurales del país.

Compostadores mecánicos: Este tipo de sistema se realiza por medio de mecanismos manuales o motorizados para airear y mezclar los residuos orgánicos en el proceso del compostaje. El compost se usa en jardines, áreas verdes y huertos escolares.

- ✓ **Biodigestión anaerobia:** Se realiza para el tratamiento de residuos agrícolas y estiércol para la producción de biogás y fertilizantes, por medio de biodigestores.
- ✓ **Vermicompostaje:** Se está implementando en instituciones educativas, centros de producción ecológica y hogares urbanos, mediante el uso de lombrices (*Eisenia foetida*) para transformar residuos orgánicos en humus [41].

4.1.1.5. Proceso utilizado en Cuba: En La Habana, la gestión de los residuos sólidos domésticos (una parte de los residuos sólidos urbanos) se ha centrado principalmente en controlar la contaminación y aplicar ciertos mecanismos ambientales de forma puntual, sin una integración sistémica. En esta ciudad, la cantidad de desechos generados por persona al día es de aproximadamente 0,48 kilogramos [48].

En cuanto al enfoque ambiental en Cuba, este ha sido establecido por la Ley No. 81 del 11 de julio de 1997, donde se define como un sistema compuesto por acciones, herramientas, mecanismos y procedimientos destinados a asegurar el manejo adecuado y sostenible de los recursos naturales. Esto implica su preservación, recuperación, seguimiento y regulación frente a las actividades humanas. La política ambiental cubana se implementa desde una perspectiva interdisciplinaria, incorporando la cultura local, la experiencia acumulada del país y la participación activa de la ciudadanía [49].

Las tecnologías utilizadas en Cuba para el tratamiento de residuos orgánicos son los siguientes:

- ✓ **Compostaje:** Se está realizando con apoyo de organizaciones y cooperativas agrícolas, con el uso de composteras comunitarias de bajo costo, aportando la materia orgánica para suelos agrícolas urbanos y rurales. [48].
- ✓ **Biodigestión anaerobia:** Se realiza para el tratamiento de residuos agrícolas y estiércol para la producción de biogás y fertilizantes, por medio de biodigestores. [48].
- ✓ **Vermicompostaje:** Se está implementando en instituciones educativas, centros de producción ecológica y hogares urbanos, mediante el uso de lombrices (*Eisenia foetida*) para transformar residuos orgánicos en humus. [48].

4.1.1.6. Proceso utilizado en Colombia: La generación per cápita es de 0,95 kg/hab/día, la recolección selectiva abarca el 17,2 % de materiales recuperables a través de diversos programas.[51] Los recicladores de base se reconocen como prestadores del servicio público de aseo, y, por lo tanto, tienen derecho a una remuneración similar a la obtenida por los prestadores de servicios de recolección.[47] El porcentaje de cobertura de recolección convencional es de 98,9 %.[41]

Se ha implementado un exitoso sistema de logística de residuos en las principales ciudades como Medellín, Bogotá, Cali y Barranquilla. La disposición final se lleva a cabo en infraestructuras, de todo lo recolectado en la ciudad el 93,18 % van a parar a rellenos sanitarios; sin embargo, en las zonas rurales, aun se observa la incineración de residuos. [49].

Las tecnologías utilizadas en Colombia para el tratamiento de residuos orgánicos son los siguientes:

- ✓ **Compostaje:** Se está realizando con apoyo de organizaciones y cooperativas agrícolas, con el uso de composteras comunitarias de bajo costo, aportando la materia orgánica para suelos agrícolas urbanos y rurales. [41]

Pilas o lechos estáticos aireados: Son procesos que se realizan en el compostaje descomponiendo el material orgánico, suministrando oxígeno para que los microorganismos descompongan la materia y se produzca el compost.

Túneles de compostaje: El proceso se realiza mediante estructuras cerradas de manera controlada, el cual permite una descomposición óptima de la materia orgánica, tiene la ventaja de poder controlar olores y emisiones, produciendo compost de alta calidad.

- ✓ **Biodigestión anaerobia:** Se realiza para el tratamiento de residuos agrícolas y estiércol para la producción de biogás y fertilizantes, por medio de biodigestores. [49]

Biodigestores tipo laguna cubierta: se realiza por medio de pozos excavados, los cuales se recubren con geomembranas que son materiales impermeables, esto para generar el espacio que se necesita para el almacenamiento de biogás (zonas rurales).

Biodigestores de flujo continuo: Se utilizan en procesos a gran escala donde la materia orgánica se introduce de manera continua, así el biogás se produce constantemente

4.1.1.7. Proceso utilizado en Tumaco Nariño: La contaminación por plásticos genera graves impactos ambientales y sociales. Afectan ecosistemas marinos, playas y vías fluviales. Por ello, y con el objetivo de reducir la contaminación por plásticos en las costas del Pacífico colombiano, la Universidad Nacional – UNAL desarrolla desde el 2024 un proyecto con las comunidades de Tumaco (Nariño) con el que recolectan este material para transformarlos en filamentos para impresoras 3D.

El nombre del proyecto es Establecimiento de estrategias ambientales y culturales para el buen manejo, disposición final, disminución del uso de plásticos en Tumaco. Trabaja, principalmente, con termoplásticos, ya que estos son los que se pueden formar con calor sin que se pierdan sus propiedades. De este material se sacan unas tiras con la ayuda de una cortadora. Para después pasarlo por un extrusora que se encarga de calentar y darle forma al plástico para poder usarlo en la impresora 3D. [52]

El relleno sanitario de Bucheli cuenta con capacidad para disponer los residuos sólidos hasta alcanzar los volúmenes de diseño establecidos, teniendo en cuenta factores como densidad de compactación, cantidad de residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario, reciclaje de residuos, lo cual se traduce en la disminución de la cantidad de residuos que ingresa al sitio de disposición final. [53]

Figura 4. Plan de contingencia en relleno sanitario de Bucheli del municipio de Tumaco



Fuente: Alcaldía de Tumaco (20)

4.2. Evaluación de los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en relleno sanitario

Siguiendo los mismos lineamientos de la propuesta de Petersen [1], [34]. Se plantearon preguntas relacionadas con publicaciones e indicadores acerca de los Rellenos sanitarios implementados en Latinoamérica. Estas preguntas tienen como finalidad consolidar un conjunto de estudios a nivel de artículos científicos y tesis de grado de maestría o doctorado pertinentes con los objetivos de la investigación.

Tabla 5. Preguntas orientadoras para la búsqueda de publicaciones sobre los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios

Preguntas orientadoras	Motivación
1. ¿Qué estudios existen acerca de los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios?	Determinar el número de publicaciones que describen resultados investigativos acerca de los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios
2. ¿Cómo se distribuyen anualmente los estudios durante el periodo 2010 – 2025?	Identificar la frecuencia de publicación durante el periodo 2010 – 2025.
3. ¿En qué países se han realizado los estudios?	Determinar los países de origen de los estudios descritos.
4. ¿Qué hallazgos presentan los estudios relevantes acerca de los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios?	Describir los resultados de los estudios acerca de los rellenos sanitarios en latinoamerica

Fuente: elaboración propia

Se plantearon criterios de exclusión e inclusión, para poder delimitar la búsqueda y tener claro los criterios de los estudios encontrados.

Tabla 6. Criterios de inclusión y exclusión de publicaciones sobre de los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés de los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés.
Publicaciones desde al año 2010 a 2025.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.
Informes de organizaciones o centros de investigación sobre los impactos ambientales generados por manejos de residuos sólidos en rellenos sanitarios	Literatura gris sin evidencia de autor o fecha de publicación.
Estudios de acceso al menos al resumen y/o abstract	Estudios sin resumen y/o abstract o sin acceso a estos.

Fuente: elaboración propia

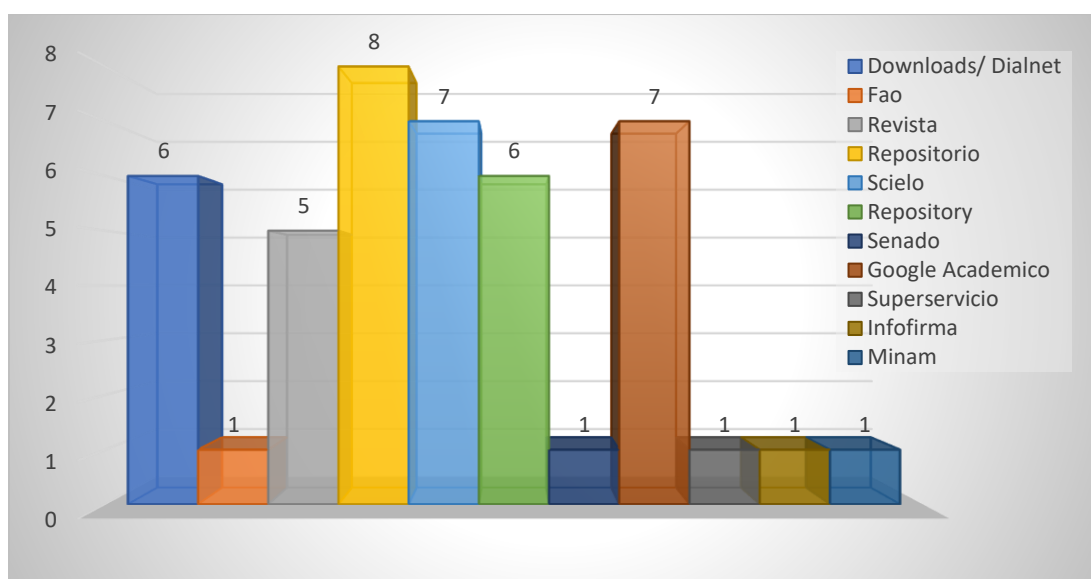
Para identificar los estudios relevantes, se tienen en cuenta las palabras claves para la búsqueda correspondiente, siendo prioridad tener en cuenta el tema específico y las variables para los estudios encontrados.

Tabla 7. Palabras clave para la identificación de estudios sobre los impactos ambientales generados por manejo de residuos solidos en rellenos sanitarios.

Palabras clave	Keywords
Celdas	Cells
Biogas	Biogas
Lixiviados	Leachate
Homogenizacion	Homogenization
Sedimentacion	Sedimentation
Secado	Drying
Oxidacion	Oxidation

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Estudio sobre los impactos ambientales generados por manejo de residuos sólidos en rellenos sanitarios



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la figura 5. De los 113 estudios publicados señalan que Dialnet, Repositorio y Scielo son las bases de datos en las publicaciones que dan respuesta a la pregunta sobre los estudios que existen acerca de los impactos ambientales generados por manejo de residuos sólidos en rellenos sanitarios. Así mismo, se encuentran otras fuentes representadas en repositorios de revistas y de universidades y organizaciones en donde existen artículos, tesis e informes.

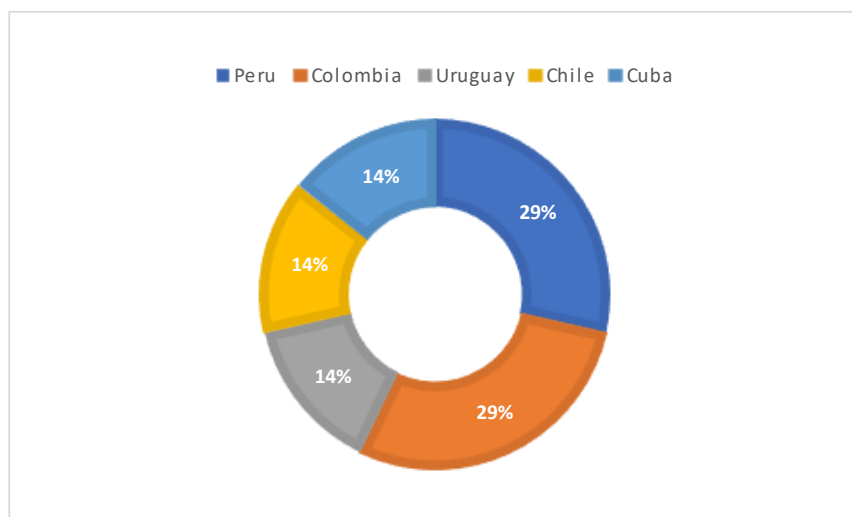
Figura 6. Distribución de publicaciones sobre impactos ambientales generados por manejo de residuos sólidos en rellenos sanitarios.



Fuente: Elaboración propia

Para dar respuesta a la segunda pregunta que tiene que ver con la distribución en el año de los estudios encontrados durante el periodo 2010 – 2025, lo cual se puede observar en la figura 6. Que de las 44 publicaciones que se encontraron sobre los impactos ambientales causados por manejo de residuos sólidos en rellenos sanitarios, entre los años 2023 – 2025 se presentaron más publicaciones que los años anteriores sobre el tema.

Figura 7. Distribución de las publicaciones relevantes por país



Fuente: Elaboración propia

Y al distribuirse por el tipo de impactos, los estudios relevantes se clasifican en 44 publicaciones sobre impactos en rellenos sanitarios donde Colombia y Perú presentan un 29% , Uruguay, Cuba y Chile con un 14%.

De acuerdo a los hallazgos anteriores, la extracción de información conforme a cada tipo de impacto, a continuación, se describen los hallazgos con los que se responde la cuarta pregunta.

4.2.1 Impacto ambiental producto de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios.

La eliminación de los residuos sólidos se ha convertido en un problema que requiere la búsqueda de soluciones en torno a los métodos y buenas prácticas por parte de los productores para, de esta manera, identificar las principales fuentes contaminantes en los rellenos sanitarios y en el entorno (54).

Impactos en Rellenos Sanitarios

Los rellenos sanitarios se implementaron como una solución frente al creciente volumen de residuos sólidos generados por las actividades humanas. No obstante, hoy en día estos espacios de disposición final son identificados como focos importantes de contaminación atmosférica, debido a la emisión de agentes biológicos, gases y subproductos derivados de la descomposición de residuos orgánicos. Esta descomposición da origen al biogás, un compuesto con alto contenido de gases de efecto invernadero, entre ellos el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas cantidades de compuestos orgánicos volátiles (COV), lo que convierte a los rellenos en una significativa fuente de emisiones antropogénicas [55].

Se presenta una matriz cualitativa, según la metodología de Leopold modificada, con criterios de evaluación: Magnitud (M), Importancia (I), Duración (D), y Tipo de efecto (T).

Tabla 8. Matriz de impactos ambientales en rellenos sanitarios más representativos por países

PAIS	IMPACTO AMBIENTAL	M	I	D	T	OBSERVACIONES TECNICAS
Perú	Contaminación de aguas subterráneas por lixiviados	4	4	Largo	Negativo	Falta de impermeabilización en botaderos activos
	Emisión de metano (CH_4)	3	3	Continuo	Negativo	Inexistencia de sistemas de captura de biogás
Colombia	Emisión de olores y GEI	4	4	Permanente	Negativo	Insuficientes tecnologías de control en rellenos grandes
	Conflictos comunitarios	3	4	Largo	Social - negativo	Falta de gestión participativa y transparencia

Uruguay	Contaminación por quema de residuos	3	3	Medio	Negativo	Presente en zonas rurales sin tratamiento formal
	Afectación a la fauna local	2	3	Progresivo	Negativo	Disposición de residuos orgánicos sin clasificación
Chile	Acumulación excesiva en mega - rellenos	4	4	Permanente	Negativo	Riesgos asociados al colapso de infraestructura en zonas urbanas
	Riesgo químico por metales pesados	3	3	Largo	Negativo	Ingreso de residuos industriales a circuitos municipales
Cuba	Propagación de enfermedades por vectores	4	4	Continuo	Negativo	Alta exposición sanitaria en sitios de disposición informal
	Degradación del suelo y paisaje	3	3	Largo	Negativo	Sin cobertura diaria ni zonificación de áreas de trabajo

Leyenda (valoración subjetiva).

Magnitud: 1 (baja) a 4 (muy alta).

Importancia: 1 (poco relevante) a 4 (crítica).

Duración: Corto, medio, largo, permanente.

Tipo: Positivo / negativo (ambiental, social o económico)

La matriz permite identificar, valorar y priorizar los principales efectos negativos que generan los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios en contextos sociales, ecológicos y tecnológicos muy distintos entre los países evaluados. Si bien todos comparten el uso de rellenos

como método de disposición final, las condiciones operativas, normativas y geográficas generan variaciones importantes en la magnitud y duración de los impactos.

4.2.1.1. Impacto ambiental en Chile

En el caso de Chile, operan cinco rellenos sanitarios de los que se recolectan alrededor de 4 millones de metros cúbicos de biogás con un poder calorífico superior a 5.000 kcal/m³. Este recurso energético es acondicionado, mezclado con gas natural y posteriormente distribuido mediante redes de tuberías para uso doméstico, llegando a cubrir aproximadamente el 40 % del consumo residencial de gas en ciertas zonas urbanas [56].

Sin embargo, esta iniciativa enfrenta dificultades debido a la disposición inadecuada de los residuos sólidos orgánicos, lo que genera consecuencias ambientales negativas, tales como la contaminación del suelo y del agua subterránea por lixiviados, emisión de olores ofensivos, proliferación de microorganismos patógenos y liberación descontrolada de gases como el metano. Además, estas condiciones favorecen la aparición de vectores transmisores de enfermedades, como insectos, roedores y aves carroñeras. Con un manejo adecuado, estos residuos podrían transformarse en recursos valiosos para generar energía o enriquecer los suelos agrícolas del país [57].

Chile, en términos de gestión de normativas de residuos, ha tenido un gran avance para lograr mitigar y poder controlar una de las problemáticas más complejas que existen en el planeta como es el manejo de residuos, aun así, existe una gran disparidad notable entre las regiones en cuanto al manejo que se le dan a dichos residuos, como por ejemplo, algunos de los residuos industriales mal manejados, llegan a los rellenos municipales, causando así graves problemas ambientales y de salud pública, aumento de plagas y vectores de enfermedades.

Otro impacto que generado negativo que ha generado el mal manejo de los residuos en Chile, es el desplazamiento de comunidades, en ciudades como Antofagasta, donde ha habido conflictos por ubicación de nuevos rellenos sanitarios ya que existen zonas residenciales muy cerca y sería perjudicial para la salud y problema de contaminación de alto riesgo.

Impactos destacados en Chile: Saturación de rellenos sanitarios y riesgos por residuos industriales mal clasificados

Chile centraliza gran parte de sus residuos en rellenos de gran escala como “Loma Los Colorados”, lo que, si bien optimiza el monitoreo, concentra el riesgo ambiental en una única zona geográfica. Si se produce una falla estructural o deslizamiento de celdas, el impacto sería devastador por su volumen acumulado.

Un problema emergente es el ingreso de residuos industriales no tratados ni clasificados, lo que conlleva riesgo de contaminación por metales pesados (Pb, Cd, Hg). Esto compromete no solo el suelo y agua, sino también la seguridad de trabajadores y el entorno urbano. Es un fenómeno ligado a vigilancia ambiental débil y a vacíos en la trazabilidad de residuos peligrosos.

4.2.4 Impacto ambiental en Uruguay

Por su parte, Uruguay ha avanzado en esta línea con el desarrollo de un proyecto de recuperación energética en el sitio de disposición final “Las Rosas”, ubicado en el departamento de Maldonado y financiado parcialmente por el Banco Mundial. Esta iniciativa busca demostrar la viabilidad del aprovechamiento del biogás generado por los residuos, tanto desde el punto de vista energético como ambiental, al reducir la emisión de gases contaminantes. El estudio preliminar del proyecto contempló dos opciones: la producción de 2 MW de energía eléctrica y la quema térmica del biogás, ambas evaluadas como factibles dependiendo del escenario

operativo. “Las Rosas” cuenta con una extensión de 19 hectáreas y una capacidad para recibir hasta 160.000 toneladas de residuos, de las cuales actualmente se gestionan anualmente unas 52.200 toneladas [58].

Entre los efectos ambientales negativos que pueden derivarse de los procesos de disposición de residuos sólidos se encuentran la generación de ruidos provocados por maquinaria pesada, la emisión de olores derivados de las excavaciones, así como la liberación de gases y partículas al ambiente, tales como metano, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y otros contaminantes, los cuales afectan la calidad del aire. También se presentan riesgos para los cuerpos de agua subterráneos y freáticos, producto de filtraciones que contienen sustancias químicas tóxicas, agentes patógenos y materia orgánica, lo que puede incluso modificar el nivel del agua subterránea.

El entorno natural sufre igualmente impactos como la degradación del suelo por erosión, pérdida de su capa fértil y alteración de su estabilidad, lo que afecta directamente la flora y fauna por la destrucción de hábitats. A esto se suman las alteraciones paisajísticas que afectan la percepción visual del entorno. En el ámbito social y económico, pueden surgir riesgos laborales derivados de accidentes y exposición a contaminantes, aunque también se presentan beneficios como la creación de empleos.

Para mitigar estos efectos, se recomienda establecer barreras vegetales alrededor de las instalaciones para reducir el impacto acústico y mejorar la estética, mantener los equipos en buen estado para minimizar el ruido y las vibraciones, controlar y tratar adecuadamente los líquidos residuales, sellar posibles puntos de fuga de gases y asegurar el uso de elementos de protección personal por parte de los trabajadores. Las emisiones químicas generadas, en algunos casos, se

mantienen dentro de los límites permitidos y no representan una amenaza significativa para los recursos hídricos [59].

La situación actual en Uruguay, en cuanto al manejo de los residuos puede ser un poco mas manejable y llevadero o podemos decir que esta más regulado en términos de disposición final, pero aún existen vertederos que se encuentran a cielo abierto específicamente en el interior del país.

Dentro de los impactos ambientales que se tienen por el mal manejo de los residuos en Uruguay tenemos:

Contaminación atmosférica localizada: Emisiones de partículas y compuestos orgánicos volátiles (COVs) por combustión de residuos.

Impacto sobre fauna silvestre: Zonas rurales ven afectada su biodiversidad por la presencia de residuos no clasificados.

Insuficiente gestión de lixiviados: Aunque Montevideo posee sistemas más tecnificados, en otros departamentos los lixiviados no se tratan adecuadamente.

Erosión social: Trabajo informal y condiciones inseguras para recicladores que operan en rellenos como Felipe Cardoso.

Impactos destacados en Uruguay: Contaminación atmosférica por quema de residuos y afectación a fauna silvestre

Aunque Uruguay tiene mejor desempeño normativo y técnico, en áreas rurales persiste el uso de quemas a cielo abierto como medida de reducción de volumen, lo cual genera aerosoles y compuestos orgánicos volátiles (COVs) que afectan directamente a la salud respiratoria de comunidades rurales.

Además, se observa un impacto ecológico menos mencionado en otros países: la interferencia directa con fauna silvestre, ya que muchos rellenos carecen de cercos, lo que facilita el acceso de especies nativas a residuos contaminados, alterando cadenas tróficas y generando dependencia alimentaria artificial.

4.2.1.4. Impacto ambiental en Perú

En Perú, aproximadamente el 70% de los residuos sólidos municipales se depositan en botaderos o rellenos sanitarios con manejo inadecuado. El crecimiento urbano ha sobrepasado la capacidad de infraestructura adecuada para el tratamiento final.

Impactos ambientales clave:

Contaminación del suelo y aguas subterráneas: Por la deficiente impermeabilización en varios rellenos, se facilita la infiltración de lixiviados, especialmente en regiones como Arequipa y Loreto.

Emisión de gases de efecto invernadero (GEI): El metano (CH_4) emitido por descomposición anaerobia de residuos orgánicos representa una fuente importante de emisiones.

Proliferación de vectores biológicos: En zonas como Piura o Puno, la presencia de vectores (moscas, roedores) es común debido a la escasa cobertura y control operacional.

Afectación paisajística: Muchos sitios no cuentan con cercos perimetrales ni barreras visuales, generando rechazo social.

En Perú, el 56% de los residuos sólidos recolectados se disponen en rellenos sanitarios autorizados, mientras que el resto es arrojado a botaderos o ríos. Si bien ciudades como Lima, Arequipa y Trujillo cuentan con rellenos técnicos, la situación en regiones amazónicas y altoandinas es crítica.

La infraestructura de disposición final está ausente en más de 900 distritos, y muchos de los rellenos existentes no cumplen con los requisitos establecidos en el D.S. N.º 014-2017-MINAM, lo que genera emisiones descontroladas de gases de efecto invernadero (GEI), infiltración de lixiviados en acuíferos, y conflictos sociales por ubicación de los sitios.

En zonas rurales, los residuos se arrojan a quebradas y riberas, generando infiltración, emisiones de GEI en rellenos activos; Algunos rellenos no poseen pozos de venteo ni mecanismos de quema controlada de gases.

Contaminación de aguas superficiales. En sitios como el botadero de Ucayali, los lixiviados llegan a cursos de agua cercanos, Impacto paisajístico y turístico sitios mal ubicados generan conflictos con actividades ecoturísticas en expansión.

Riesgo por incendios espontáneos: La fermentación interna de residuos genera acumulación de calor, provocando combustión.

Impactos destacados en Perú: Contaminación de aguas subterráneas por lixiviados, emisión incontrolada de metano (CH₄)

Perú presenta una situación crítica en cuanto al control de lixiviados, particularmente en regiones amazónicas y andinas donde la topografía accidentada y la alta pluviosidad incrementan la movilidad de contaminantes hacia mantos acuíferos. La falta de geomembranas y sistemas de captación agrava esta situación.

La emisión de gases, especialmente metano, no solo contribuye al cambio climático, sino que representa una pérdida energética potencial si no se aprovecha. El valor alto en magnitud y duración refleja que este impacto no es puntual, sino estructural.

4.2.1.5. Impacto ambiental en Cuba

En Cuba, la recolección de residuos sólidos urbanos (RSU) es gestionada principalmente por entidades estatales bajo la coordinación de los gobiernos municipales. Sin embargo, existen deficiencias críticas en transporte, cobertura de recolección y disposición final. Aunque algunos sitios son denominados “rellenos sanitarios”, la mayoría operan como vertederos controlados sin impermeabilización, cobertura ni tratamiento de lixiviados o gases.

Los principales sitios de disposición como el de Guanabacoa en La Habana han superado su capacidad operativa, generando riesgos de contaminación por escorrentía contaminada, proliferación de vectores biológicos, y emisiones de metano sin captación.

La mayoría de los sitios de disposición final no cuentan con sistemas de impermeabilización (geomembranas, capas de arcilla), ni drenaje de lixiviados. Esto permite que los líquidos percolados (lixiviados) se filtren al subsuelo y alcancen acuíferos o fluyan por escorrentía hacia fuentes hídricas.

El manejo de residuos sólidos en los rellenos sanitarios de Cuba representa un foco de impacto ambiental sistémico que afecta todos los componentes del entorno: agua, aire, suelo, biodiversidad y salud pública. La ausencia de tecnologías clave como sistemas de impermeabilización, monitoreo de biogás, cobertura diaria, drenaje de lixiviados y cercamiento sanitario ha convertido muchos sitios de disposición en puntos críticos de contaminación ambiental y riesgo social.

La solución requiere no solo inversión estatal, sino cooperación internacional, diseño participativo, educación ambiental comunitaria y normativas actualizadas con enfoque preventivo y restaurativo.

Impactos destacados en Cuba: Propagación de enfermedades por vectores biológicos y degradación paisajística y del suelo urbano

Cuba enfrenta desafíos estructurales para modernizar su gestión de residuos. Muchos sitios de disposición son abiertos, sin cobertura diaria ni aislamiento, lo que crea condiciones propicias para la proliferación de moscas, roedores y zancudos vectores de enfermedades como dengue, leptospirosis o parasitosis intestinales.

La carencia de una zonificación clara y de planificación urbanística hace que los botaderos colapsen, generando pérdida de valor del suelo urbano, afectación visual y disminución de la calidad de vida. Estos impactos, aunque no siempre visibles en matrices tradicionales, tienen consecuencias profundas en salud pública y planificación territorial.

4.2.1.6 Impacto ambiental en Colombia

Actualmente, en Colombia existen 165 rellenos sanitarios, 12 estructuras temporales conocidas como celdas de contingencia y 89 vertederos sin control, los cuales en conjunto representan cerca del 6 % de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero. En el año 2020, el servicio público de recolección de residuos gestionó aproximadamente 13,5 millones de toneladas, de las cuales el 67 % provino de las ciudades capitales. Durante la última década, la cantidad de residuos administrados por este servicio aumentó en un 30 %, reflejando un incremento considerable en la generación de desechos [60].

Entre las zonas más vulnerables se encuentran Bucaramanga, con el relleno sanitario El Carrasco; así como Sogamoso, Duitama, Tunja, Bogotá (relleno Doña Juana), Medellín, e Ibagué (La Miel), donde se evidencian riesgos significativos para el ambiente y la salud pública. A pesar de este panorama, el porcentaje de residuos aprovechados en Colombia es bajo, ubicándose entre

el 15 % y el 17 %, cifras inferiores a las alcanzadas por países como Suecia (99 %), Austria (63 %), Alemania (62 %), Bélgica (58 %) y los Países Bajos (51 %). No obstante, según el investigador Barreto Castillo, Colombia podría alcanzar niveles de aprovechamiento entre el 25 % y el 30 % mediante estrategias de reciclaje, reutilización, producción de energía y desarrollo de economías circulares [60].

Por lo anterior, se puede afirmar que el promedio de desechos sólidos municipales de las grandes áreas urbanas aumentó a 0,9-1,3 kilogramos por persona por día [61]. Se han realizado estudios los cuales demuestran que el lixiviado está compuesto por microorganismos patógenos como, por ejemplo, *Escherichiacoli*, en concentraciones altas, bacteria que contamina los embalses de agua, presentando riesgos para la salud. [62]

En Colombia existen más de 200 rellenos sanitarios, pero la vida útil de dichos rellenos sanitarios, ya alcanzaron su vida útil. Las zonas costeras del país como la costa atlántica y la costa pacífica son las que tienen mayor precariedad en el manejo de residuos.

Impactos destacados en Colombia: Emisión de olores ofensivos y GEI Conflictos socioambientales por localización de rellenos

Colombia exhibe un fenómeno que va más allá del componente físico: la externalidad social del mal manejo de residuos. Los conflictos comunitarios en torno a sitios como "Doña Juana" en Bogotá o "La Glorita" en Norte de Santander, muestran que el relleno sanitario puede convertirse en un foco de protesta social prolongada si no se gestionan adecuadamente los impactos colaterales (ruido, tráfico, salud).

Por otro lado, la emisión de gases no solo se relaciona con mal manejo, sino con la ausencia de tecnologías de biometanización o celdas de gasificación, lo que implica un impacto doble: ambiental y energético.

Colapso de capacidad operativa: Casos como el relleno "Doña Juana" en Bogotá reflejan una sobreexplotación sin una adecuada planeación a largo plazo.

Contaminación hídrica: Descargas no controladas de lixiviados en cuerpos de agua, especialmente en el Valle del Cauca.

Degradación del aire: Emisiones de olores ofensivos y GEI, sin sistemas efectivos de captación y quema de biogás.

Conflictos socioambientales: Comunidades cercanas denuncian afectaciones en salud y calidad de vida.

4.2.1.7 Impacto ambiental en el relleno sanitario La Glorita

Ubicado en Pereira, a una altura de 1423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21°C y una precipitación promedio de 2750 mm/año. Esto lo que hace un ambiente óptimo para el proceso de descomposición anaerobia y aumentando la producción de biogás en el relleno. (Occidental de Construcciones S.A., 1998).

En algunos rellenos sanitarios se ha realizado la estimación de emisiones de gases y la predicción de biogás generado durante su operación, lo cual ha permitido calcular las toneladas de dióxido de carbono equivalente que podrían ser evitadas mediante la captura y quema del biogás [62]. Un caso preocupante es el del relleno sanitario La Glorita en Pereira, donde la acumulación inadecuada de residuos está afectando los ecosistemas locales y la salud de la población. Los líquidos residuales que se generan, conocidos como lixiviados, alteran la demanda biológica y química de oxígeno en los cuerpos de agua, además de contener elementos tóxicos como cloruros, plomo, hierro y cobre, que terminan siendo vertidos en ríos sin un tratamiento adecuado [63].

Figura 8. Relleno sanitario La Glorita



Fuente: (rellenosanitariolaglorita.wordpress.com/) Las dos caras de la basura en el relleno sanitario La Gloria, Pereira Edison Zapata

4.2.1.8 Relleno sanitario de Bucheli del municipio San Andrés de Tumaco

El relleno sanitario Bucheli está localizado en la zona rural del municipio de San Andrés de Tumaco, en el departamento de Nariño, específicamente en el kilómetro 19 de la vía que conecta esta población con la ciudad de Pasto. Esta instalación de disposición final está compuesta por diferentes áreas operativas que permiten su funcionamiento integral.

Según la información recopilada, el relleno sanitario cuenta con una Licencia Ambiental, cumpliendo con la normativa vigente, en inspecciones realizadas, se puede decir que existe un buen manejo de lixiviados, se observan las cunetas de aguas lluvias y el sistema de tratamiento de lixiviados en funcionamiento, las chimeneas para la extracción de gases se encuentran activas,

No obstante, el relleno ha sido clausurado en ocasiones por incumplimiento de la normatividad, el Plan de Gestión de Residuos Sólidos se encuentra desactualizado, lo que no permite un funcionamiento adecuado del sitio de disposición final.

El relleno sanitario cuenta con las siguientes zonas como se describe a continuación:

Manejo residuos sólidos: En este sitio se implementan procedimientos orientados a reducir al máximo los impactos ambientales negativos generados por los desechos. Para ello, se realizan acciones como el pesaje y registro sistemático de los residuos que ingresan, seguido por su correcta descarga en las celdas de disposición, todo dentro de un esquema controlado de operación [65].

Figura 9. Manejo de residuos sólidos en el relleno sanitario Bucheli



Fuente: elaboración propia (25)

Tratamiento de Lixiviados: Los líquidos generados por la descomposición de residuos, conocidos como lixiviados, son recolectados desde cada celda a través de un sistema de drenaje. Posteriormente, son conducidos mediante una red de tuberías hacia la planta de tratamiento, donde se les aplica un proceso físico-químico que permite reducir su carga contaminante de acuerdo con los lineamientos operativos establecidos. Esta planta inició su funcionamiento completo en mayo de 2014, y desde entonces, el volumen de descarga tratado y liberado hacia la quebrada El Guayabo es de aproximadamente 2,6 litros por segundo, controlado diariamente mediante técnicas de medición volumétrica [66].

Laguna de homogenización: Los lixiviados tratados inicialmente se dirigen a una laguna de mezcla cuya capacidad máxima es de 170 metros cúbicos. No obstante, como medida de seguridad, se limita su llenado a un tope de 130 m³. En esta etapa, los líquidos permanecen alrededor de 24 horas para lograr una estabilización parcial antes de ser sometidos al siguiente tratamiento [67].

Figura 10. Laguna de homogenización en el relleno sanitario Buchelli



Fuente: elaboración propia (25)

Tanques de oxidación: Los efluentes provenientes de la laguna de estabilización, ingresan a los Reactores 1 y 2, tanques de oxidación con una capacidad de 20 m³ cada uno, para recibir tratamiento químico mediante la adición de Peróxido de hidrógeno al 50% con el fin de oxidar la carga conteniente del afluente. [68].

Figura 11. Tanque de oxidación en el relleno sanitario Buchelli



Fuente: elaboración propia (25)

Tanques de Floculación y sedimentación: Una vez que se ha aplicado cloruro férrico al flujo y se ha ajustado el pH a un valor cercano a 6,5, se activa la fase de floculación y posterior sedimentación dentro del cuarto reactor, el cual posee una capacidad de 20 metros cúbicos. En este espacio, los líquidos permanecen alrededor de 12 horas para permitir la formación y asentamiento de los flóculos [69].

Lechos de secado: Después de que se completa la sedimentación, los lodos generados son transferidos a estructuras de secado conformadas por capas de arena y grava, con diámetros de 10", 4" y 1". Estos filtros cuentan con una capacidad total de 80 metros cúbicos. De manera semanal, se realiza el mantenimiento de estos sistemas, que incluye la extracción de los lodos secos, los cuales son posteriormente tratados con cal hidratada para su estabilización antes de ser trasladados a las celdas correspondientes para su disposición final [70].

Vertimiento: El agua clarificada que sale del cuarto reactor es canalizada hacia una caja de inspección. Desde allí, mediante una bomba eléctrica, se dirige hacia el sitio designado de descarga sobre la quebrada El Guayabo, completando así el proceso de tratamiento de los lixiviados [71].

Figura 12. Vertimiento en relleno sanitario Bucheli



Fuente: elaboración propia (25)

Disposición final: Es la conducción, depósito y aislamiento de los residuos, especialmente los que no son clasificados como aprovechables en sitios destinados y reglamentados legalmente para tal propósito, bajo especificaciones y criterios especiales de tipo técnico, tecnológico, ambiental y sanitario para que no causen ningún riesgo, ni impacto perjudicial al medio ambiente ni a la salud humana [72].

Figura 13. Disposición final de los residuos sólidos en relleno sanitario Bucheli.



Fuente: elaboración propia (25)

Tabla 9. Registro de toneladas dispuestas en el relleno sanitario Bucheli Tumaco

MES	REGISTRO DE TONELADAS DISPUESTAS EN EL RELLENO SANITARIO							
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	2.230,77	2.386,93	2635,38	2.711,99	2807,81	2.675,57	3224,98	3335,25
Febrero	1.866,10	2.018,62	2453,53	2.465,66	2409,43	2.675,57	2881,25	3019,53
Marzo	2.068,08	2.181,62	2642,63	3.133,73	2886,49	2.988,21	3168,63	3353,43

Abril	2.024,83	2.162,13	2405,69	2.465,65	2628,85	3.110,00	3127,38	3210,45
Mayo	2.450,45	2.361,41	2599,47	2.287,00	2430,30	3.173,70	3185,02	3378,73
Junio	2.528,60	2.465,99	2434,52	2.562,10	2666,05	3.157,72	3230,27	3245,00
Julio	2.299,23	2.439,79	2710,37	2.635,49	2822,48	3.164,38	3272,06	3361,65
Agosto	2.271,68	2.374,98	2937,79	2.700,29	2660,00	3.142,21	3303,94	3317,18
Septiembre	2.073,37	2.276,10	2375,70	2.596,64	2768,79	3.055,67	3137,33	3267,12
Octubre	2.131,14	2.347,74	2497,90	2.577,10	2675,57	3.152,59	3335,56	3394,00
Noviembre	2.245,61	2.283,39	2467,04	2.557,42	2675,58	3.136,59	3225,6	3239,24
Diciembre	2.563,63	2.621,39	2679,34	2.863,96	2675,58	3.562,45	3439,39	3450,01
TOTAL	26.753,49	27.920,09	30.839,36	31.557,03	32.106,92	36.994,66	38.531,41	39.571,59
PROMEDIO MENSUAL	2229,46	2326,67	2569,95	2629,75	2675,58	3082,89	3210,95	3957,16

Fuente: Aguas de Tumaco (23)

Figura 14. Celda de Operación Relleno Sanitario de Bucheli en el municipio de Tumaco Nariño.



4.3 Análisis

De acuerdo con los estudios encontrados, puede destacarse que entre los procesos ejecutados en Latinoamérica para el manejo de los residuos sólidos se destaca el implementado en Colombia en Bogotá y Ciudad de México, el cual es denominado planes basura cero, reciclaje, y donde las empresas prestadoras del servicio de aseo deben cubrir dichas necesidades. Muchos países vienen implementando leyes y regulaciones para mejorar la gestión de residuos sólidos, además los gobiernos y empresas privadas han implementado programas de reciclajes de los materiales para fomentar la clasificación de los residuos que permitan la transformación y posibilidades económicas como oportunidad para reducir la generación de residuos y promover la sostenibilidad ambiental, en diferentes países lo que ha contribuido a reducir la cantidad de residuos que están llegando a los rellenos sanitarios y los impactos ambientales, además se encontró que hay países como Nicaragua, Honduras, El Salvador que no cuentan con políticas y recursos financieros para implementar programas para el tratamiento de la disposición final de los residuos, la implementación del compostaje y la incineración quedan reducidos básicamente a las limitaciones económicas para el desarrollo de proyectos, técnica y económicamente factibles, aunado a la incipiente participación de los sectores formales en dichas actividades, otro factor determinante que se encontró es la falta de conciencia ciudadana sobre la importancia de la disposición adecuada de los residuos ya que esta situación viene generando impactos negativos en el ambiente causando afectaciones en la sociedad.

Se puede inferir que los impactos ambiental generados en los rellenos sanitarios como; Contaminación de aguas subterráneas por lixiviados, emisión de metano (CH_4), emisión de olores y GEI, conflictos comunitarios, contaminación por quema de residuos, afectación a la fauna local, acumulación excesiva en mega - rellenos . riesgo químico por metales pesados, propagación de enfermedades por vectores, degradación del suelo y paisaje, siguen siendo una de los principales contaminantes de los ecosistema, que puede traer impactos negativos como es la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales con lixiviados que contienen sustancias químicas, biológicas y peligrosas, además producen contaminación del aire emitiendo gases de efectos invernadero, como el metano y otros gases tóxicos que pueden afectar la calidad del aire, otro factor contaminante es el suelo con sustancias químicas y biológicas peligrosas que pueden afectar la fertilidad del suelo especialmente en la producción agrícola, por consiguiente toda esta contaminación afecta en la salud humana provocando enfermedades respiratorias, gastrointestinales, cutáneas y cáncer por la exposición de sustancias químicas expuestas a la contaminación ambiental.

Por lo anterior, se hace necesario la identificación de los impactos ambientales en relleno sanitarios generados en la disposición final de residuos, puntualmente en la etapa de operación de los rellenos sanitarios, son delicados y ameritan que se les preste la debida atención. Según Caraballo (2014), (73) la relación existente entre contaminantes ambientales y salud humana es un proceso complejo.

5. Alternativas Tecnologías para el manejo de residuos orgánicos

Las tecnologías limpias hacen referencia a la implementación de métodos orientados a minimizar los efectos negativos sobre el entorno, mediante prácticas como la reutilización, el

reemplazo de materiales, la recuperación de recursos y su valorización. Estas estrategias pueden ir desde ajustes operativos simples hasta soluciones avanzadas que requieren inversiones significativas en desarrollo e innovación [75].

Algunos ejemplos accesibles y efectivos incluyen el uso de compostaje, biodigestores o lombricultura para transformar los residuos orgánicos urbanos en fertilizantes naturales. Esta transformación no solo mejora las condiciones del suelo agrícola, sino que también representa una alternativa útil para disminuir, controlar o incluso evitar los impactos ambientales que suelen originarse en los sitios de disposición final de residuos [75].

Teniendo en cuenta la propuesta de Petersen sistemático [34] se plantean las siguientes preguntas:

Tabla 10. Preguntas orientadoras para el mapeo sistémico de tecnologías aplicadas

Pregunta	Motivación
1. ¿Qué estudios existen sobre Tecnologías aplicadas en un caso en particular?	Identificar alternativas de de tecnologías en un caso en particular.
¿Cómo se distribuyen las publicaciones de acuerdo con los años durante el periodo 2010 – 2025?	Determinar la periodicidad de las publicaciones sobre estas tecnologías.
¿En qué países se han realizado las publicaciones sobre tales tecnologías?	Identificar los países más prolíficos en estudios relacionados con tales tecnologías.
2. ¿Qué tipo de tecnologías son utilizadas en un caso en particular?	Determinar los procesos de fabricación de las tecnologías aplicadas en rellenos sanitarios.
4.¿Qué hallazgos describen las publicaciones acerca de las tecnologías aplicadas en un caso en particular?	Describir los resultados de las tecnologías implementadas para reducir los impactos de la contaminación ambiental.

Fuente: elaboración propia (25)

Una vez definidas las preguntas, para dar respuesta a la primera se siguen los criterios de inclusión y exclusión descritos en la Tabla 18, con los cuales es posible identificar estudios pertinentes.

Tabla 11. Criterios de exclusión e inclusión de publicaciones sobre alternativas tecnológicas

Inclusión	Exclusión
Publicaciones en español e inglés sobre alternativas tecnológicas	Publicaciones en otro idioma diferente al español e inglés sobre alternativas tecnológicas .
Publicaciones desde al año 2010 a 2025.	Publicaciones anteriores a 2010
Artículos de revisión o de resultados completos disponibles en bases de datos o repositorios de revistas científicas.	Artículos incompletos.
Tesis de maestría o doctorado en físico o digitales disponibles en repositorios de universidades relacionadas con el tema.	Tesis de nivel de pregrado.

Fuente: elaboración propia

Además, se establecieron palabras clave en español e inglés con las cuales se logró delimitar con mayor pertinencia los estudios que pueden ser relevantes para identificar las alternativas tecnologías aplicadas en un caso en particular.

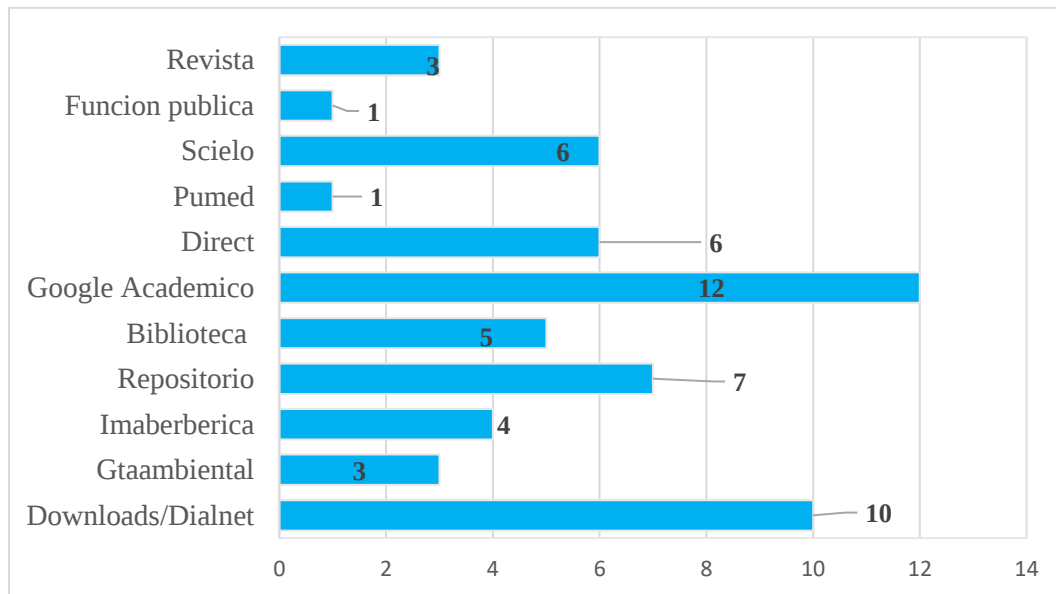
Tabla 12. Palabras clave para la identificación de estudios relevantes

Palabras clave	Keywords
Residuos Solidos	Solid Waste
Lombricultivo	Vermiculture
Compostaje	Composting
AlternativasTecnologicas	Technological Alternatives

Fuente: elaboración propia

Con base en los anteriores criterios, el proceso de búsqueda arrojó un total de 58 publicaciones, de las 113 publicaciones iniciales, relevantes para responder la pregunta uno.

Figura 15. Estudios sobre alternativas tecnológicas



Fuente: elaboración propia

Según la figura 1, las publicaciones encontradas sobre las tecnologías aplicadas que son relevantes están disponibles en google academico (12), Dialnet con (10), Direct con (6), Imaberberica (4), Scielo (6) otras fuentes, representadas en repositorios digitales de tesis de grado doctorales de universidades, de informes de organizaciones y otros, seguidas de Pumed y Gtaambiental.

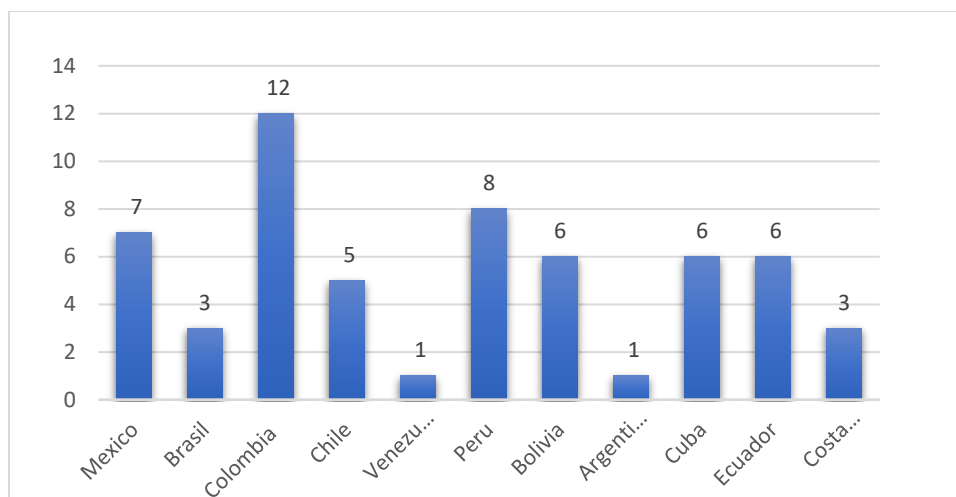
Figura 16. Publicaciones sobre alternativas tecnológicas



Fuente: elaboración propia

La figura 16. Muestra cómo se distribuyen las publicaciones de acuerdo con los años, se puede observar que entre los años 2022- 2025 se realizaron con mayor frecuencia este tipo de estudios, notándose así la importancia del tema sobre las tecnologías aplicadas en rellenos sanitarios para el manejo de residuos orgánicos.

Figura 17. Distribución de publicaciones sobre alternativas tecnológicas



Fuente: elaboración propia

Así mismo, según los países de origen de las publicaciones, sobre las tecnologías aplicadas en rellenos sanitarios para el manejo de residuos orgánicos, la mayoría se concentran en Colombia (12), seguidos de Peru, (8), México (9) Bolivia (6), Chile (5), Venezuela (1).

Luego, a partir de la extracción de información, para dar respuesta a la última pregunta, los estudios relevantes dan cuenta de hallazgos sobre las publicaciones acerca de las tecnologías aplicadas en un caso en particular, tal como se describen a continuación:

5.1.1. Tecnología de Compactación

Las máquinas compactadoras, también conocidas como prensas industriales, son equipos diseñados para disminuir significativamente el volumen de los desechos mediante la aplicación de fuerza mecánica, que comprime el material hasta darle forma cúbica. Este proceso facilita el almacenamiento, transporte y tratamiento de los residuos, y permite su posterior valorización, ya sea a través del reciclaje o de una disposición final más eficiente [77].

Un sistema completo de compactación de residuos sólidos municipales puede incluir diferentes etapas, como la separación de materiales reutilizables, trituración, tamizado y empaque de elementos como cartón, papel, metales, vidrio y otros. La fracción restante, no reciclable, puede someterse a procesos biológicos. Para su operación óptima, este sistema requiere una infraestructura especializada con múltiples prensas empacadoras, bandas transportadoras y estaciones de clasificación para optimizar la recuperación de materiales valiosos [76].

Por lo anterior, se puede decir que este tipo de tecnología ofrece beneficios directos en la reducción de costos, espacio y gestión. La desventaja de este tipo de proceso es la demora de la degradación de los residuos orgánicos, siendo la eficiencia un factor que depende del tipo de residuos, pero no deja de ser una herramienta importante para la gestión de residuos sólidos sostenible.

Figura 18. Sistema de compactación RSM



Relleno seco, manejo de las pacas (IMABE Ibérica, sin año)

El sistema permite la compactación de los RSM sin sorteo y separación de las fracciones reutilizables. Este procedimiento es denominado “todo uno” y requiere sólo el equipo marcado como equipo indispensable en la Figura 19 [78]

figura 19. Sistema de compactación de RSM



Fuente: (IMABE Ibérica, sin año)

5.1.2. Tecnología de Lombricultura

La lombricultura es una técnica biotecnológica que se basa en el uso de lombrices para transformar residuos orgánicos biodegradables en productos de alto valor agrícola, como el humus o lombricomposta. Este abono natural mejora la fertilidad del suelo y aporta nutrientes esenciales para los cultivos. Una de las especies más utilizadas en este proceso es la *Eisenia phoetida*, comúnmente conocida como lombriz roja californiana, que digiere los residuos y los convierte en biomasa útil. [79].

Figura 20. Proceso de lombricultivo



Fuente: Pisabay

Importancia de la Lombricultura

Desde una perspectiva ambiental, la lombricultura contribuye al reciclaje de residuos generados por actividades agrícolas, ganaderas, industriales y urbanas. A nivel económico, representa una alternativa empresarial accesible, con bajos costos de operación, riesgos mínimos y posibilidades de generar ingresos sostenibles en corto plazo, tiene una eficiencia del 45% - 60% [80].

La lombricultura es una tecnología sostenible que permite ayudar a reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejorar la calidad del suelo, además es de bajo costo, especialmente

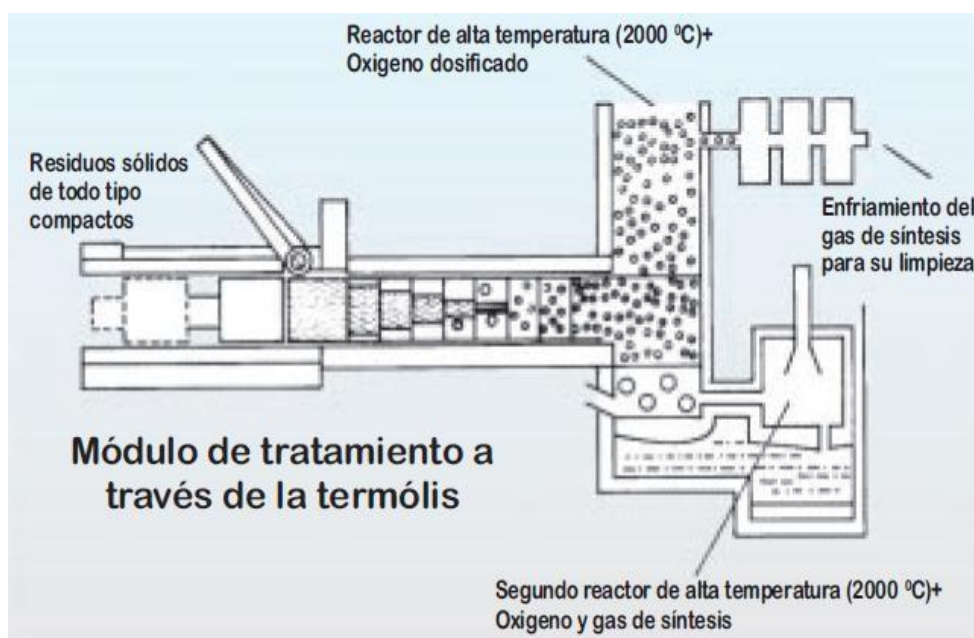
si se utiliza materia orgánica disponible localmente, esta puede ser implementada en una variedad de entornos desde pequeños jardines hasta grandes operaciones agrícolas.

5.1.3. Tecnología de Termólisis para residuos orgánicos

La termólisis es un método avanzado para el tratamiento de desechos sólidos de diversa procedencia. Se basa en un proceso de descomposición térmica que no requiere oxígeno del ambiente, ya que utiliza el contenido molecular del propio residuo. Como resultado, se obtienen gases aprovechables, compuestos líquidos y residuos sólidos, los cuales pueden tener valor comercial [81].

El fundamento de esta tecnología radica en la descomposición de moléculas complejas en estructuras más simples —como carbono, hidrógeno, biogás, hidrocarburos ligeros y compuestos aromáticos— mediante el control preciso de presión y temperatura. Esta alternativa permite una gestión eficiente y energética de los residuos, al tiempo que contribuye a reducir su volumen y potencial contaminante, tiene una eficiencia del 60% -80% [81].

Figura 21. Esquema del equipo necesario para llevar a cabo la Termólisis



Fuente: Tomada del Ministerio de Medio Ambiente, Ficha técnica No.7.3.3.

Beneficios de la Tecnología Termólisis

Es de anotar que la Termólisis implica la descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno produciendo gases, líquidos y sólidos, además puede producir energía en forma de gases combustibles, líquidos y sólidos, también ayuda a reducir la cantidad de residuos que se depositan en los rellenos sanitarios valorizando los residuos orgánicos para convertirlos en productos útiles.

5.1.4. Tecnología de Vermicompostaje

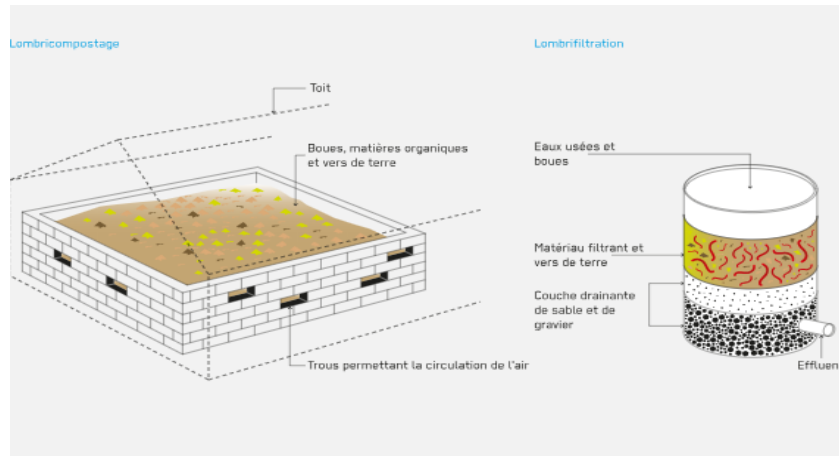
La vermicompostaje es el resultado de un procedimiento biotecnológico de bajo costo, que facilita la descomposición y estabilización de residuos orgánicos mediante la interacción

entre lombrices y microorganismos [82]. El resultado es un material estable, uniforme y de textura fina, con aplicaciones valiosas en proyectos de restauración ambiental y mejora de la fertilidad de suelos [83]

Este método se fundamenta en el comportamiento alimenticio de ciertas lombrices detritívoras, las cuales son capaces de habitar y procesar una amplia gama de materiales orgánicos. La vermicultura se considera una opción eficiente y sostenible para el tratamiento de residuos biodegradables, funcionando como una alternativa complementaria al compostaje tradicional [84].

Durante el proceso, las lombrices transforman la materia orgánica en una sustancia rica en nutrientes, similar al humus, conocida como humus de lombriz, teniendo una eficiencia entre el 30% -60% [85]. Este resultado se debe a una doble acción: física y bioquímica. Físicamente, las lombrices remueven, oxigenan y fragmentan los residuos; mientras que los microorganismos se encargan de descomponerlos químicamente. Esta cooperación entre fauna del suelo y microorganismos convierte compuestos orgánicos complejos en formas más simples y asimilables para las plantas [86].

Figura 22. Proceso de Vermicompostaje



Fuente: emersan-compendium tecnologías.

5.1.5. Tecnología de lixiviados

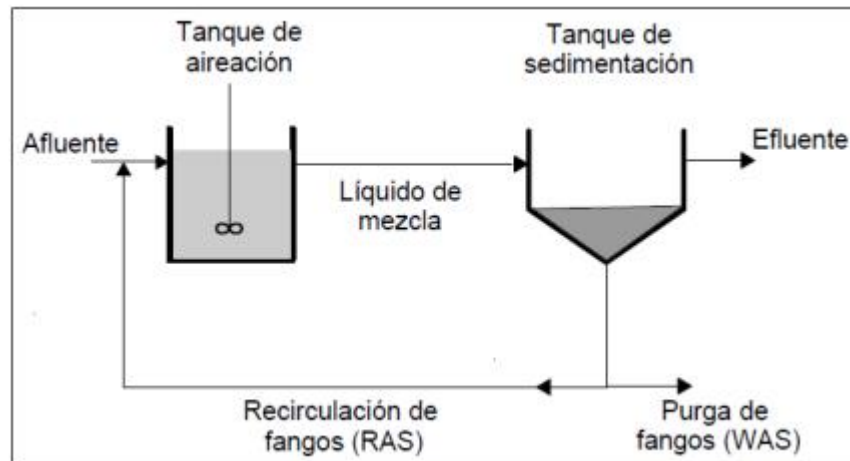
El control adecuado de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios es esencial para minimizar su impacto ambiental. Para tratar estos líquidos contaminantes que se generan por la descomposición de residuos y la infiltración de agua, se aplican distintos métodos tecnológicos con diversos niveles de complejidad. Entre ellos se encuentran procedimientos físicos, químicos, biológicos, y en algunos casos, se recurre a su envío a estaciones de tratamiento de aguas residuales para una gestión final más especializada. [87].

Procesos Físico-Químicos

Cuando se trata de lixiviados envejecidos, cuya capacidad de ser degradados biológicamente es limitada (por sus bajos valores de relación DBO5/DQO), se recurre con mayor frecuencia a tratamientos fisicoquímicos [88]. Estos incluyen técnicas como la coagulación y la floculación, las cuales ayudan a separar contaminantes, aunque presentan como desventaja la

producción excesiva de lodos y un alto consumo de insumos químicos como sulfato de aluminio, cloruro férrico o sulfato ferroso [89].

Figura 23. Lodos activados



(BÓRDALO et al, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (2007).

5.1.6. Tecnología de Biodigestor

A nivel global, la ciencia y la tecnología se orientan cada vez más hacia soluciones sostenibles que permitan reducir el impacto de la actividad humana. Dentro de estas alternativas, el uso de biodigestores ha cobrado importancia, ya que transforman desechos orgánicos en recursos aprovechables, particularmente energía [90].

Un biodigestor es un sistema cerrado, sin acceso al oxígeno exterior, que se alimenta de residuos orgánicos de origen vegetal o animal. En su interior, los microorganismos descomponen la materia orgánica mediante un proceso conocido como digestión anaerobia, liberando como resultado biogás, una fuente energética útil [91].

Esta tecnología resulta especialmente adecuada para zonas rurales, donde ofrece una solución accesible y económica tanto para el tratamiento de residuos como para el suministro energético. Además, contribuye a reducir las emisiones contaminantes, siendo una opción válida frente al cambio climático [92].

Figura 24. Biodigestor rural



Fuente: ACUASE FUNDACION (2021)

Producción de Biogás

Los materiales que ingresan y abonan el Biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás [93].

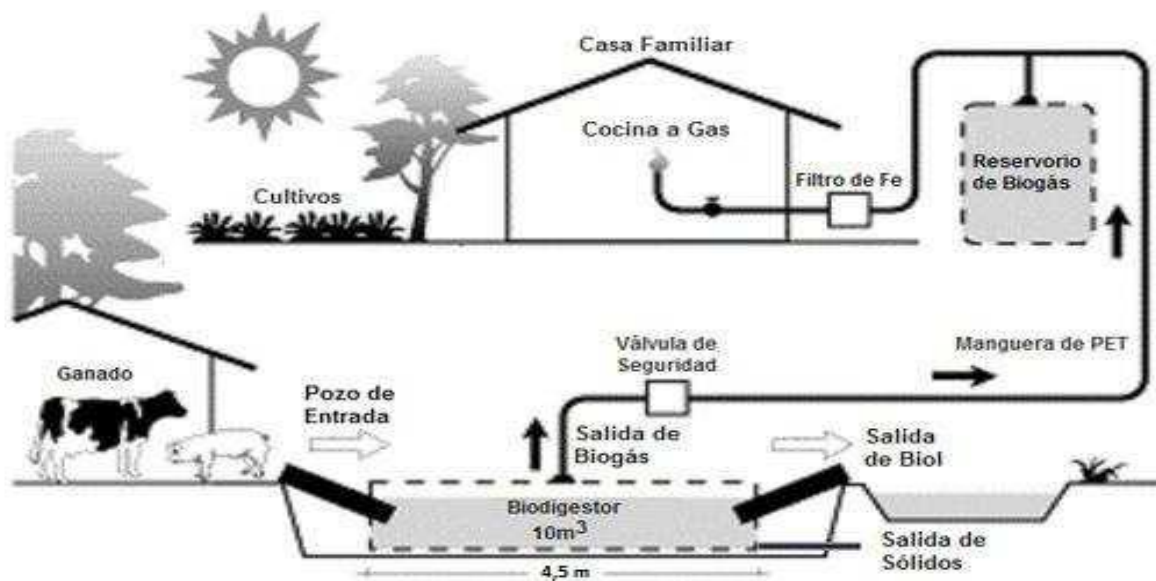
Proceso de la Biodigestión

En este caso el biodigestor es la fermentación realizada por bacterias anaerobias sobre la materia orgánica y posee las ventajas siguientes:

- Proporcionar combustible para suplir las principales necesidades energéticas rurales.

- Reducir la contaminación ambiental al convertir las excretas, que hacen proliferar microorganismos patógenos, larvas e insectos, en residuos útiles.
- Producir abono orgánico, con un contenido similar al de las excretas frescas e igualmente útil para los suelos, los cultivos y para el desarrollo del fitoplancton y del zooplancton utilizado por algunas especies acuáticas en su alimentación. [94]

Figura 25. Ejemplo de procesos de la biodigestión



Fuente (altertec)

5.1.7. Tecnologías de valoración energética de los residuos

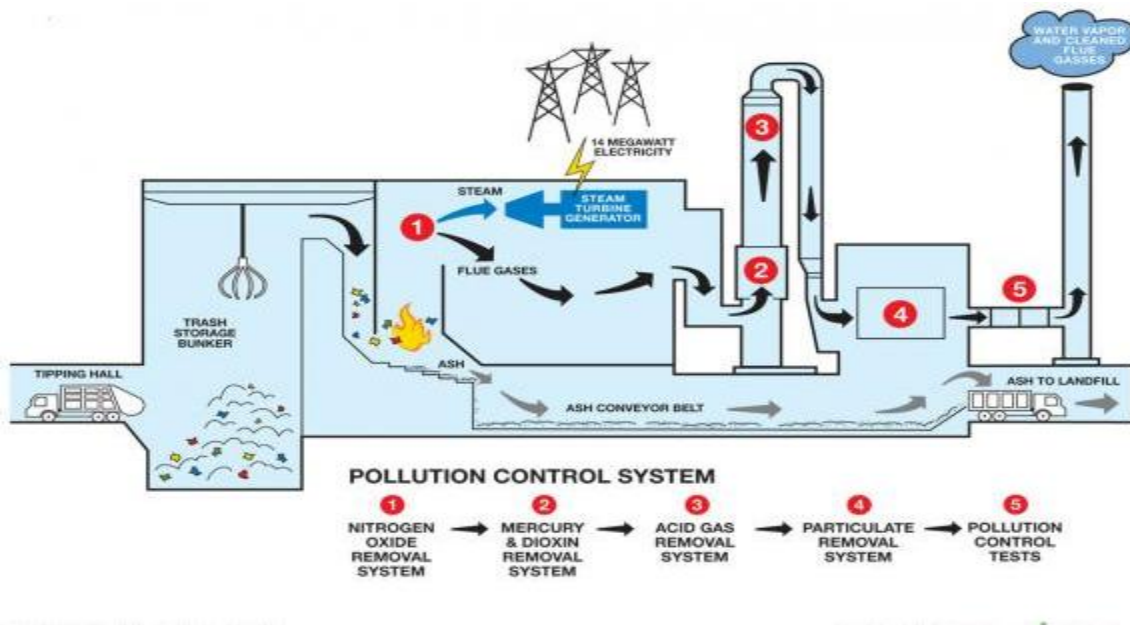
Uno de los propósitos fundamentales en los sistemas de manejo de residuos es recuperar tanto materiales como energía, al tiempo que se asegura una disposición final adecuada. Esto contribuye significativamente a disminuir las emisiones de gases con efecto invernadero y otros impactos nocivos sobre el medio ambiente [95].

La elección de la tecnología de valorización no depende únicamente del costo económico o de la eficiencia en la obtención de energía, sino que también considera criterios ambientales que garanticen un proceso sostenible [96]. Entre las principales tecnologías empleadas para obtener energía a partir de residuos están los tratamientos térmicos y biológicos. En el primer grupo se encuentran técnicas como la incineración, la gasificación y la pirólisis. En el segundo, se incluyen procesos como el compostaje y la digestión anaerobia.

Cuando los residuos no pueden ser aprovechados mediante reciclaje o tratamiento, se destinan a rellenos sanitarios. En estos sitios, la descomposición natural de los residuos genera biogás, el cual puede ser capturado y utilizado como fuente energética [97].

Además, según la composición de la biomasa, se pueden obtener productos con valor agregado. Por ejemplo, las biomásas ricas en aceites pueden ser transformadas mediante procesos como la esterificación o la sacarificación, los cuales convierten compuestos complejos como almidones o celulosas en azúcares simples [98]. Por su parte, la biomasa lignocelulósica se puede someter a distintos tratamientos, entre ellos combustión, digestión anaerobia, pirólisis, gasificación, hidrólisis o licuefacción [99].

Figura 26. Instalación de valoración energética



Fuente: Opemed 2025

5.2 Tecnología aplicada para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en el relleno sanitario Bucheli

A partir de los estudios encontrados, se describen las alternativas de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje.

El objetivo de esta tecnología es aprovechar los residuos orgánicos que se depositan en el relleno sanitario de Bucheli ubicado en la zona rural de Tumaco Nariño, para transformarlos en abonos orgánico empleando prácticas como el compostaje, minimizar los residuos en la disposición final, minimizar los impactos ambientales.

5.2.1 Tecnología de Compostaje

Para el relleno sanitario Bucheli sería una buena alternativa ya que el compostaje es una tecnología de bajo costo, que garantiza que los residuos orgánicos vinculen sus componentes en el ciclo de la cadena de producción primaria, además permite mejorar las condiciones físico-químicas del suelo y aumenta la productividad de los cultivos. [100]

5.2.2 Proceso del Compostaje

Este proceso tiene una duración aproximada de tres meses, durante los cuales la materia orgánica experimenta transformaciones significativas en su estructura, humedad y composición. Estas modificaciones ocurren a lo largo de cuatro fases principales. [101]

Fermentación Mesófila

Durante la etapa inicial, se da una fermentación mesófila caracterizada por un incremento térmico en la pila, alcanzando temperaturas cercanas a los 40 °C. En esta fase predominan microorganismos que operan en un rango entre los 15 y 35 °C, los cuales inician el proceso de descomposición al consumir carbohidratos simples [102]. Las pilas analizadas registraron temperaturas promedio entre 43 °C y 45 °C, y ya se evidenciaba una reducción considerable del volumen sin presencia de malos olores [102].

Figura 27. Etapa mesófila



Fuente: Sostenibilidad 2024

Etapa Termofilicas

Posteriormente, se produce un aumento de temperatura que llega a superar los 54 °C, alcanzando incluso valores cercanos a los 60 °C. Este cambio inhibe a los microorganismos mesófilos y favorece a los termófilos, cuyas enzimas son capaces de degradar moléculas más

complejas como las proteínas. Además, esta etapa es fundamental para la eliminación de agentes patógenos presentes en los residuos [103].

Figura 28. Etapa termofílica.



Fuente: Sostenibilidad 2024

La tercera etapa es el enfriamiento, que inicia con la disminución de temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente, esto ocurrió desde el día 22 hasta el día 90, donde se registraron temperaturas de 28.3, 28.3 y 28.1 °C, como se observa en la Figura 1. Esta disminución se genera por la reducción de energía en el compost y reactivación de los microorganismos mesófilos que descomponen los azúcares restantes (Zeng et al., 2010). [104]

Figura 29. Etapa de enfriamiento



Etapa de Maduración

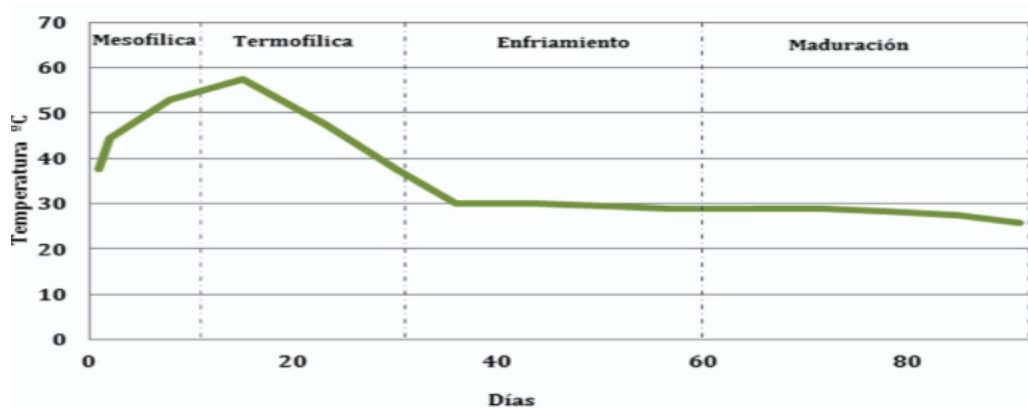
Por último, en la etapa de maduración, donde los compostajes alcanzaron temperaturas de 25.9, 25.8 y 26.3 °C, se reduce la actividad metabólica. Sin embargo, los compuestos menos degradables se descomponen y surgen los precursores de sustancias húmicas (Vélez-Sánchez-Verín et al., 2008), [105] además de la disminución en un 40% aproximadamente, del volumen de las pilas.

Figura 30. Etapa de maduración



Fuente: Sostenibilidad 2024

Figura 31. Comportamiento de la temperatura



Separación en la fuente

El Compostaje consiste en procesar los residuos vegetales que se generan en las viviendas para llegar a generar el abono, por lo que se debe pasar por tres etapas. “Al llegar a la compostera se les hace un proceso de volteo, que es un proceso aeróbico y necesita oxigenación. Ayuda a que no se generen malos olores y que los microorganismos trabajen de mejor manera”, explica el ingeniero capacitador [106].

Figura 32. Proceso de volteo



Fuente: Foto Valeria Almeyda Ordóñez

Durante la etapa inicial del compostaje, la temperatura puede ascender hasta los 70 °C como resultado del proceso de descomposición y la acumulación de calor generada por la actividad biológica. Una vez que la primera celda alcanza su capacidad máxima, el material se transfiere a una segunda celda, donde se realiza el volteo dos veces por semana. Luego de aproximadamente seis semanas, el compost está en condiciones de ser utilizado. Este sistema se compone de cuatro celdas: tres en operación con residuos en distintas fases del proceso y una

cuarta que permanece libre para facilitar las labores de rotación y posterior distribución del compost obtenido [107].

Cuando la temperatura supera los 45 °C, los microorganismos mesófilos, que son activos a temperaturas moderadas, dejan de actuar, siendo reemplazados por los termófilos, capaces de sobrevivir y trabajar a temperaturas de hasta 100 °C. Esta etapa de alta temperatura puede extenderse durante varios meses y es clave para la sanitización del material, ya que elimina agentes patógenos y otros contaminantes biológicos presentes en la mezcla [107].

Al finalizar la fase termófila, se presenta una reducción gradual de la temperatura. En este punto, se evalúa si es necesario realizar un nuevo volteo para reiniciar el aumento térmico o si se permite que el proceso continúe con el enfriamiento progresivo. Durante esta etapa más templada, los microorganismos mesófilos reanudan su actividad, completando la descomposición de la materia orgánica [108].

Finalmente, se inicia la fase de maduración, la cual ocurre a temperatura ambiente. En esta última etapa, que puede durar varios meses, el compost alcanza su estado óptimo de estabilidad. Se consolidan nuevas estructuras moleculares y se integran comunidades de microorganismos diversos, así como organismos macroscópicos como lombrices, ácaros e insectos, que ayudan a finalizar la transformación del material orgánico en un producto útil para el suelo [108].

Beneficios del aprovechamiento de residuos orgánicos

El tratamiento adecuado de los residuos orgánicos genera una serie de ventajas significativas, especialmente en términos sociales y ambientales. Una de las principales es la

disminución del impacto negativo que enfrentan las comunidades cercanas al relleno sanitario Bucheli, quienes históricamente han sido las más perjudicadas por la gestión inadecuada de estos desechos.

La implementación del compostaje como método de tratamiento busca reducir el volumen de residuos orgánicos que ingresan al relleno en un rango del 45 % al 60 %. Esta práctica permite transformar estos materiales en insumos útiles como abonos naturales, los cuales favorecen la fertilización ecológica y la restauración de suelos empobrecidos. Asimismo, se facilita el paso hacia sistemas agrícolas sostenibles, como la agroecología, gracias a la disponibilidad de nutrientes orgánicos de bajo impacto ambiental.

Además, el uso de compost disminuye la dependencia de fertilizantes químicos, ayudando a reducir la liberación de gases que contribuyen al cambio climático. Esta medida también estimula el crecimiento de vegetación en zonas urbanas, ya que provee sustratos que mejoran el desarrollo de las plantas y elevan la captación de dióxido de carbono atmosférico, contribuyendo así a contrarrestar el calentamiento global.

Por otro lado, el compost mejora las condiciones físico-químicas del suelo, como la regulación del pH, lo cual favorece el rendimiento de los cultivos. Finalmente, al disminuir la acumulación de residuos orgánicos en descomposición dentro del relleno, se reducen los malos olores que afectan directamente a los habitantes más cercanos a esta zona [109].

Figura 33. Aprovechamiento de residuos



Fuente: Derichebourg (24)

Proceso de degradación en el Compostaje en el relleno sanitario Bucheli

El compostaje comienza con el material orgánico a temperatura ambiente; sin embargo, en un corto período —ya sea en horas o pocos días— se observa un incremento térmico que puede alcanzar hasta los 40 °C. Este aumento es provocado por la intensa actividad de los microorganismos, los cuales metabolizan compuestos sencillos de carbono y nitrógeno, lo que produce energía en forma de calor.

En esta etapa inicial, se descomponen sustancias solubles como los azúcares, lo que a su vez puede generar ácidos orgánicos y una disminución en el pH del medio. Debido a las altas temperaturas generadas, esta fase también se conoce como la etapa de sanitización, ya que contribuye a eliminar agentes patógenos como *Salmonella* spp. y *Escherichia coli*, así como huevos de helmintos, esporas de hongos dañinos para las plantas y semillas no deseadas, garantizando así un producto final libre de contaminantes biológicos [110].

Durante el proceso, los residuos orgánicos se degradan de forma completa, obteniendo como resultado un material de textura uniforme, color terroso y partículas homogéneas. Estas

características indican que el compost fue producido bajo parámetros óptimos de temperatura, pH y humedad, lo cual se logró gracias a una adecuada oxigenación del material mediante el volteo periódico de las pilas [111].

En el caso de la central de abastos, la generación diaria de compost alcanzó los 0,75 kg. El porcentaje promedio de conversión del material inicial en compost fue del 61,7 %, una cifra que coincide con los valores reportados por otras experiencias agrícolas, que estiman rendimientos entre el 50 % y el 60 %. El resto del residuo orgánico se pierde en forma de vapor de agua y dióxido de carbono liberado durante el proceso biológico. Los detalles de esta producción se encuentran consolidados en la tabla [112].

Tabla 13. Rendimiento en peso de la producción de compost.

Ensayo	Peso residuos frescos (kg)	Peso compost (kg)	Rendimiento (%)
1	24	14.8	61.6
2	24	14.2	59.1
3	24	15.5	64.5
Promedio	24	14.8	61.7

El compost óptimo para su aprovechamiento agrícola requiere de parámetros como el pH, materia orgánica, fósforo, magnesio y potasio entre otros, que dimensionan la calidad del producto obtenido del proceso de compostaje.

Se puede afirmar que los residuos orgánicos que se generan en el relleno sanitario de Bucheli de Tumaco Nariño, está ubicado en la zona rural y por ende está relacionado con el sector agrícola, con la implementación del compostaje se requiere transformar los residuos orgánicos

garantizando, que los residuos orgánicos vinculen sus componentes en el ciclo de la cadena de producción primaria, además permite mejorar las condiciones físico-químicas del suelo y aumenta la productividad de los cultivos para su aprovechamiento del abono orgánico en el trabajo del campo que les permita promover la economía circular, finalmente la integración del compostaje con los rellenos sanitarios presenta una oportunidad para reducir el impacto ambiental de la gestión de residuos, especialmente los orgánicos. .[113].

6. Discusión sobre Alternativas de Tecnologías aplicadas para el relleno sanitario Bucheli

Las tecnologías presentadas en el capítulo son el resultado de la búsqueda de la información, basadas en implementación de gestión de residuos en los rellenos sanitarios que permitan minimizar los impactos ambientales en el ecosistema.

Estas tecnologías se vienen empleando en diferentes países en los rellenos sanitarios para mejorar la eficiencia, reducir el impacto ambiental y optimizar la gestión de los residuos. Estas tecnologías abarcan desde la compactación de residuos hasta la captura y utilización de gases, pasando por la gestión de lixiviados y la impermeabilización de los rellenos.

Es de anotar que en algunos países de Latinoamérica la normatividad ambiental no se cumple a cabalidad, sobre todo por la falta de recursos financieros para implementar políticas que permitan mejorar la gestión de residuos sólidos, las tecnologías aplicadas suelen ser muy costosas especialmente si se requiere equipos especializados en algunos casos son complejas, ya que requieren control preciso de las condiciones de proceso tal el caso de Chile donde los RSO no se disponen apropiadamente ocasionando serios impactos ambientales.

Desde la generación de lixiviados que contaminan el subsuelo y las aguas subterráneas, junto con las consecuencias de malos olores, presencia de patógenos y la emisión de gases de efecto invernadero. Si los RSO tuvieran un tratamiento apropiado podrían generar valor, ya que se podrían utilizar para producir energía y también nutrientes para los campos de Chile. [55].

En resumen, la aplicación de tecnologías en los rellenos sanitarios es crucial para mejorar la eficiencia, reducir el impacto ambiental y asegurar la gestión sostenible de los residuos. Dentro de las tecnologías empleadas en los rellenos sanitarios se encontró la lombricultura, que es la tecnología de crianza de lombrices, en base a desechos orgánicos biodegradables, permite reciclar la materia orgánica y obtener el Humus. Para generar un valor agregado de estos desechos ha sido necesario convertirlos, a través de tratamientos, en productos útiles como, la lombricomposta (humus).

La lombricultura es una tecnología sostenible que permite ayudar a reducir la dependencia de fertilizantes químicos y mejorar la calidad del suelo, además es de bajo costo, especialmente si se utiliza materia orgánica disponible localmente, esta puede ser implementada en una variedad de entornos desde pequeños jardines hasta grandes operaciones agrícolas, además el Vermicompost es un proceso tecnológico de bajo costo que permite la bio-oxidación, degradación y estabilización de residuos orgánicos por la acción conjunta de lombrices y microorganismos, del cual se obtiene la vermicompost, un producto final estabilizado, homogéneo y de granulometría fina.

Este proceso tecnológico eficiente puede convertir residuos orgánicos en productos de valor agregado para las prácticas de restauración ecológica y programas de fertilidad del suelo, con la Termólisis que es una tecnología innovadora permite el tratamiento simultaneo de desechos sólidos de diferentes orígenes; consiste en la descomposición de materia logrando una

combustión espontánea, empleando oxígeno contenido en las moléculas y no tomado de la atmósfera, produciendo gases útiles, gases tóxicos, líquidos y sólidos que pueden ser comercializados. [74].

El Compostaje como *Proceso aerobio* de degradación de materia orgánica, con aumento de temperatura de forma controlada; se realiza por acción de microorganismos en presencia de aire para generar el abono orgánico llamado compost, se emplea la gestión de los lixiviados como proceso vital para mitigar los efectos contaminantes que tiene un relleno sanitario sobre el medio ambiente. Para manejar los lixiviados que son recogidos o acumulados en el relleno se emplean diferentes métodos y tecnologías de diversas complejidades, tales como procesos físicos, químicos, biológicos, y en última instancia el descargue de los lixiviados a una planta de tratamiento de aguas residuales. [80]. Por ende, el biodigestor como contenedor cerrado de forma hermética contiene residuos orgánicos de origen vegetal o animal (carne en descomposición, excrementos... Un grupo de microorganismos presentes en los desechos orgánicos producen una reacción conocida como fermentación anaeróbica, de la que se puede obtener energía. [83]

Por consiguiente, se requiere Tecnología de Compactación, máquina que reduce el volumen de la basura que pasa por ella, a través de una presión ejercida hacia el material para que adopte una forma cúbica permite recuperar y valorizar los residuos, ya sea para que posteriormente sean reciclados o para que sean desechados de forma correcta.

Dentro de las diferentes alternativas tecnologías implementadas en los rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios se escogió el compostaje como alternativa *para el caso del relleno sanitario Bucheli*.

7. Conclusiones

De acuerdo a la investigación basado en cada uno de los objetivos planteados y siguiendo el primero de los específicos, se puede concluir que los procesos utilizados en Latinoamérica para el manejo y tratamiento del componente orgánico de los residuos sólidos vienen mejorando de manera progresiva la gestión y tratamiento de residuos sólidos ha evolucionado con diversos procesos que buscan ser más sostenibles y eficientes.

En general, los procesos utilizados incluyen la recolección selectiva, el reciclaje, la compostación y, en algunos casos, la valorización energética de los residuos. Muchos países están promoviendo la separación en origen para facilitar el reciclaje y reducir la cantidad de residuos que terminan en vertederos. Además, se están implementando tecnologías más modernas y campañas de sensibilización para fomentar una cultura de manejo responsable de los residuos.

Por otra parte, los resultados que dan respuesta al segundo objetivo específico de la investigación permiten concluir que los impactos ambientales generados por cada proceso de manejo de residuos sólidos orgánicos compactados en rellenos sanitarios municipales, aunque son una solución común para la disposición de residuos sólidos, generan diversos impactos ambientales que no deben ser subestimados.

Con base en la investigación de las alternativas tecnológicas aplicadas en un caso en particular que corresponden al tercer objetivo específico, puede concluirse que de acuerdo a las diferentes tecnologías implementadas en los rellenos sanitarios se escogió el compostaje para aplicarlo en el relleno sanitario de Bucheli ubicado en la zona rural de Tumaco Nariño, por la eficiencia, beneficios y ventajas para el medio ambiente que se puede llegar a obtener por medio de esta tecnología.

El uso de tecnologías de compostaje en este caso específico ha demostrado ser una solución efectiva y sostenible para gestionar los residuos orgánicos. Gracias a la implementación de sistemas de compostaje controlados, se ha logrado transformar los residuos en abono de alta calidad, reduciendo significativamente la cantidad de desechos enviados a los rellenos sanitarios y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la utilización de tecnologías como el compostaje aeróbico, el control de humedad y temperatura, y la monitorización constante, ha permitido optimizar el proceso, acelerando la producción y garantizando un producto final seguro y nutritivo.

En conjunto, estas tecnologías no solo contribuyen a la protección del medio ambiente, sino que también fomentan prácticas agrícolas más sostenibles y responsables. Sin duda, la aplicación de estas innovaciones representa un paso importante hacia una gestión de residuos más ecológica y eficiente.

Finalmente, como conclusión general se puede afirmar que la selección y aplicación de tecnologías apropiadas para la gestión del componente orgánico en rellenos sanitarios municipales es clave para avanzar hacia sistemas de gestión de residuos más responsables, ecológicos y económicamente viables. Es importante seguir investigando, innovando y adaptando estas tecnologías para mejorar continuamente la gestión de residuos en beneficio del medio ambiente y la comunidad.

8. Recomendaciones

Debido a que los rellenos sanitarios son un foco de contaminación ambiental es fundamental que cuenten con sistemas adecuados de control, como captación de gases, tratamiento de lixiviados y monitoreo ambiental, para minimizar estos impactos.

Antes de seleccionar o mejorar tecnologías, es importante evaluar las características específicas del componente orgánico en los residuos, como su cantidad, tipo y grado de biodegradabilidad. Analizar las diferentes opciones disponibles, como el compostaje, la digestión anaeróbica o el control de condiciones ambientales, considerando su viabilidad técnica, económica y ambiental en el contexto local.

Tener en cuenta la infraestructura existente, recursos humanos y económicos disponibles para implementar y mantener las tecnologías seleccionadas. Capacitar al personal encargado y sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de gestionar adecuadamente los residuos orgánicos, promoviendo prácticas sostenibles. Coordinar la gestión del componente orgánico con otras etapas del manejo de residuos, promoviendo una economía circular y el aprovechamiento de recursos.

Bibliografía

[1] FAO, Compostaje: vamos a devolver algo al suelo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i5201s/i5201s.pdf>

[2] Contraloría General de la República, Gerencia regional de recursos naturales y gestión del medio ambiente: plan operativo institucional 2016. Residuos sólidos, Cajamarca: Gobierno Regional, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/0/01327D79B019A23F05257F0E0012D797/\\$FILE/Gerencia_Regional.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/0/01327D79B019A23F05257F0E0012D797/$FILE/Gerencia_Regional.pdf)

[3] S. Espinoza-Cusipuma, C. Marrero-Saucelo, F. Hinojosa-Enríquez y R. A. Mendoza-Vizcarra, “Manejo de residuos sólidos en la gestión municipal de Huancavelica, Perú: visión verde, manejo integral y participación ciudadana,” Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales, vol. 28, pp. 163–177, 2020. [En línea]. DOI: <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.28.2020.4269>

[4] E. A. Toro, R. Pacheco y J. F. Villablanca, Gestión de residuos sólidos: una guía para el diseño de políticas públicas municipales, CEPAL, 2016.

[5] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Informe nacional: disposición final de residuos sólidos, Bogotá, 2018.

[6] N. Lozano Rodas, Plan de contingencia para mitigar la contaminación ambiental por inadecuada disposición final de residuos sólidos en un asentamiento humano de Chachapoyas, 2022.

[7] Programa para el Nuevo Ambiente, “Reducción de residuos sólidos,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/noticias/comunicado-de-prensa-unidad-de-residuos-solidos/>

[8] C. M. Cortés, Estudio de los residuos sólidos en Colombia, El Externado de Colombia, 2018.

[9] M. T. Mora, Revisión bibliográfica sobre el manejo de los residuos sólidos orgánicos para la preparación de abonos orgánicos en la planta de residuos sólidos de Girardot, Universidad de Cundinamarca, 2020.

[10] J. Díaz Alarcón y A. E. Cardozo Gutiérrez, “Análisis de la gestión de residuos sólidos en Colombia a través de la evaluación de normas ambientales sanitarias,” 2022. [En línea]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/2002

[11] Alcaldía Distrital de Tumaco, Informe sobre el cierre temporal del relleno sanitario de Tumaco, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://tumaco-narino.gov.co/noticias/cierre-temporal-del-relleno-sanitario-basura-cerrado>

- [12] D. B. Bravo y A. G. Rengifo, Manejo de residuos sólidos y su impacto en la cultura ambiental sanitaria en Santa Elena, Ecuador (Tesis de pregrado), Univ. Estatal Península de Santa Elena, Ecuador, 2023.
- [13] J. I. Banquera Luna, Diseño e implementación de una propuesta educativa basada en un sistema de separación y aprovechamiento de residuos sólidos domiciliarios en el barrio Nuevo Amanecer, zona Palafito, municipio de Tumaco-Nariño, 2022.
- [14] S. Muñoz Rodríguez, Y. Patiño Montalvo y C. Ziemons Valencia, Metodologías innovadoras para el aprovechamiento de residuos en Colombia, Universidad EAN, 2023.
- [15] E. M. Salamanca Castro, “Estrategias para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos producidos en la plaza de mercado de Fontibón,” Tesis de pregrado, 2014.
- [16] D. T. Alvarado Dávila y S. A. Rangel Zambrano, “Riesgos ambientales y su percepción por parte del recurso humano en el manejo de residuos en las organizaciones,” Revista Colombiana de Ciencias Sociales, vol. 13, no. 1, pp. 257–274, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uss.edu.pe/index.php/rccs/article/view/3935/1918>
- [17] Centro Control Contaminación del Pacífico CCCP, Condiciones de la contaminación marina en el Pacífico colombiano. Informe técnico anual 2010, Buenaventura: DIMAR, 2010.
- [18] Alcaldía Municipal de Tumaco, Plan de ordenamiento territorial 2000–2012, 2006. [En línea]. Disponible en: http://portalsnrponte.gov.co/es/contenidos/planes/pot_2008_2019.pdf

[19] COSERNA S.A., Declaración de impacto ambiental para el proyecto de disposición final de residuos sólidos en el municipio de Tumaco, 2005. [En línea]. Disponible en: http://portalsnrponte.gov.co/es/contenidos/planes/pga/pot_2008_2019/documentos/PGA_20150802.pdf

[20] A. Arias, A. Mendoza y C. Romero, Riesgos biológicos, químicos y daño al medio ambiente por la inadecuada disposición de residuos sólidos en el barrio 20 de enero de Cúcuta, Tesis doctoral, Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO, 2021.

[21] Programa para el Nuevo Ambiente, Reducción de residuos sólidos, 2023. Recuperado 20 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/noticias/comunicado-de-prensa-unidad-de-residuos-solidos/>

[22] Contraloría de Cundinamarca, Gestión integral de los residuos sólidos en Cundinamarca, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104739>

[23] C. Villamil, “Obtención de cómo la basura afecta el entorno,” Noticias ONU, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2018/03/1436562>

[24] A. A. Escalante et al., Guía técnica para el aprovechamiento de residuos sólidos municipales: modelo de cooperación interinstitucional, Bogotá: IDEAM, 2022.

[25] G. Angulo Meza, “Fortalecimiento de los procesos de reciclaje en el municipio de Tumaco,” ART, 2019.

[26] C. L. Riascos, R. F. Romero y C. N. C. Melo, “Efecto del número de impurezas y el tiempo de contacto en la trampa de grasas para evaluar su capacidad de retención,” Revista Técnica en Marcha, 2020.

[27] C. D. Bastidas, R. F. Romero y C. N. C. Melo, “Determinación de parámetros fisicoquímicos con la dinámica en la bahía de Tumaco,” Boletín Científico Centro de Control de Contaminación del Pacífico (cerrado en 2009), no. 15, pp. 83–89, 2008.

[28] M. Ochoa Miranda, Gestión integral de residuos: análisis normativo y herramientas para su implementación. Editorial Universidad del Rosario, 2018.

[29] M. R. Romero Miguel and J. F. Samir Paredes, Herramientas para el aprovechamiento de los residuos sólidos en aprovechamiento industrial. ICESI, Universidad Santiago de Cali, 2019.

[En línea]. Disponible en:

https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10088/7811?mode=full

[30] Y. C. González and J. V. Villalobos, “Manejo ambiental de residuos electrónicos: análisis de la generación de componentes específicos por categorías de residuos, su tratamiento en las empresas y su grave efecto”, Revista Tecnológica en Marcha, vol. 31, no. 3, pp. 14–23, 2018.

[En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i3.2845>

[31] M. M. Morales, Recopilación, análisis y propuesta de buenas prácticas ambientales en el manejo de residuos sólidos. Universidad Nacional Autónoma de México, 2021.

[32] FAO, Pérdidas y desperdicios de alimentos en la agricultura y la alimentación, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3951s/i3951s.pdf>

[33] C. Hernández y M. C. Méndez, “Metodología de la investigación”, Revista de Ciencias Sociales y Humanidades, vol. 13, no. 4, pp. 32–41, 2018.

[34] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, y M. Mattsson, “Systematic mapping studies in software engineering”, en 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), Karlskrona, Suecia, 2008.

[35] G. Altillo, Gestión de residuos como prioridad política en la región. Perspectivas regionales de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe, ONU Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe, 2018.

[36] SWANA, “Executive Summary”, Eurasian Technological & Environment – Western Symposium of Solid Waste Association of North America, California, 2012.

- [37] A. M. Urueta de Bogotá, Modelo de aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en los barrios de Bogotá, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2021-02/Modelo-de-aprovechamiento.pdf>
- [38] P. Taboada Gossauer, P. Aguilar-Vigón, y C. Cruz-Sotelo, “Impacto de los residuos sólidos en el medio ambiente y en la salud humana”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 22, no. 4, pp. 25–36, 2013.
- [39] G. Pabón-Ramos, *Residuos sólidos municipales, minería urbana y el cambio climático*, Bogotá: Ediciones Eco, 2018.
- [40] N. M. Imazón-Martínez, “La gestión integral de residuos sólidos municipales en América Latina: la intención y la realidad”, *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, vol. 17, pp. 26–59, 2015.
- [41] A. J. Sáez y A. J. Urbanati, “Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe”, *Opinión Ambiental*, vol. 12, pp. 13–15, 2014.
- [42] J. Letbetjed, *Los servicios de gestión de residuos sólidos municipales en América Latina*, Public Services International Research Unit (PSIRU), 2017.
- [43] A. Muñoz, *Software como servicio para la gestión integral de residuos orgánicos en condiciones de municipios*, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile, 2019.

- [44] B. Tadeo, “La importancia de la gestión ambiental municipal. Estudio de doce municipios del departamento de Santa Ana, El Salvador,” *Ambientico*, no. 252, pp. 22–34, 2017.
- [45] G. Amézquita, “Tarifas y financiamiento de los servicios de manejo de residuos sólidos,” *Teb-Especiales*, pp. 127–148, 2013.
- [46] M. Durand, “El sistema ‘compuesto’ de manejo de residuos en los municipios: ¿cómo sacar provecho de sus incidencias en el desarrollo?,” *Perspectivas Geográficas*, no. 17, pp. 27–48, 2012.
- [47] J. Labbédoize, “Los servicios de gestión de residuos sólidos municipales en América Latina,” *Public Services International Research Unit (PSIRU)*, 2017.
- [48] L. Althausen, F. Peinado, E. Sturzenegger y R. Vialeoni, “Avances y desafíos para el reciclaje inclusivo en ciudades de América Latina y el Caribe,” *The Economist Intelligence Unit*, 2017.
- [49] O. Sánchez, *La gestión de residuos en La Habana: claves, complejidades y desafíos*, La Habana: CIEGO, 2019, pp. 135–245.
- [50] A. Hernández, “Unidad de análisis de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 33, no. 1, pp. 17–28, 2017.

[51] D. Collado-Lopera, D. Echeverry-Lopera y H. Collado-Lopera, “Situación actual de la gestión integral de residuos sólidos en Colombia,” *Informador Técnico*, vol. 83, pp. 131–154, 2019.

[52] 3D Home Central, “3D Home Central,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://3dhomecentral.com>. [Accedido: 27-abr-2025].

[53] Cámara de Comercio de Tumaco, “Dinámica social, económica y empresarial de Tumaco,” 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.ccitumaco.org/dinamica-social-economica-2025-ccitumaco/>. [Accedido: 27-abr-2025].

[54] M. Ochoa Miranda, “Gestión de residuos en ciudades intermedias: análisis teórico y herramientas para su implementación,” *Estudios de la Universidad del Rosario*, 2018.

[55] COSMEBAR S.A., *Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Cúcacitas*, 2006.

[56] Ilustre Municipalidad de Tocopilla, *Declaración de Impacto Ambiental relleno sanitario municipal Quebrada Encantada, Antofagasta, Chile*, 2009.

[57] Kristopher Ingenieros, *Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario comuna de Caldera*, 2009.

[58] Ilustre Municipalidad de Huasco, Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario comuna de Huasco, 2009.

[59] Ilustre Municipalidad de Mejillones, Declaración de Impacto Ambiental proyecto relleno sanitario Mejillones, 2009.

[60] Senado de la República de Colombia, "Crisis ambiental en Colombia: El Relleno Sanitario vs. la Capital," Senado Noticias, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.senado.gov.co/index.php/el-senado/noticias/1339-crisis-ambiental-colombia-basura-capital>. [Accedido: 28-abr-2025].

[61] E. Balaguera et al., "Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar," Ciencia Tecnológica Agropecuaria, vol. 15, no. 1, pp. 73-81, 2014.

[62] C. Martínez et al., "Cuantificación y caracterización de los residuos de alimentos del comedor central estudiantil de la Universidad del Zulia," Revista Ecosistemas, vol. 25, pp. 43-47, 2016.

[63] M. Scholz et al., "Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: A review," Applied Biochemistry and Biotechnology, vol. 148, pp. 445-459, 2008.

[64] E. Cevallos, "Energía obtenida a partir de biogás," Cuadernos Económicos, vol. 11, no. 1, pp. 117-140, 2012.

- [65] J. Duque-Florez, "Factores asociados en los residuos de alimentos que intervienen en la reducción de sulfuro de hidrógeno en la etapa de lodos," *Ecoambiental*, vol. 4, pp. 90-96, 2019.
- [66] K. Kumar and S. S. Sahu, "Waste to Energy for Efficient Management of Municipal Solid Waste," *Waste Management*, vol. 47, pp. 705-710, 2017.
- [67] R. Sinha et al., "Compost supplementation with vermiwash and management in composting process," *Waste Management*, vol. 27, pp. 190-195, 2007.
- [68] A. Sowe, T. H. Gani and H. Sheikh, "Municipal Solid Waste (MSW) Physicochemical Properties for Bio-Fuel Production: Estudio del efecto de catalizadores," *Fuel Processing Technology*, vol. 176, pp. 129-137, 2018.
- [69] R. Sandhu et al., "Kitchen Waste to Value-Added Products," *Journal of Environmental Management*, vol. 241, pp. 19-30, 2019.
- [70] V. T. Bhaskar and T. T. Bhaskar, "Bioconversion Review on the Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass," *Renewable Energy*, vol. 129, pp. 695-716, 2018.
- [75] G. Zeng et al., "Effects of inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* on composting," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 222-227, 2010.

[76] J. Vélez et al., "Biotecnologías ambientales para el tratamiento de residuos orgánicos," Environmental Biotechnology for Treatment of Organic Waste, vol. 2, pp. 131-144, 2008.

[77] C. A. López Servidones, "Tipos de mezcla y separación de la fuente," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.unal.edu.co>.

[80] A. Ortiz Ordóñez Ibanez Izahel, Fundamentos teóricos de la termólisis aplicada al tratamiento de desechos sólidos, Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003.

[85] URL: <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/04/04/040108.doc>. [Consulta: 14 abril 2025].

[86] C. Bordalo et al., Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos, vol. 1, Ingeniería Química, Tratamiento de residuos, 2007.

[87] N. Méndez, "Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton," Ingeniería e Investigación, vol. 35, pp. 57-64, 2010.

[88] T. Yilmaz and S. Ozcicek, "Coagulation–flocculation and air stripping as pretreatment of young landfill leachate," The Open Environmental Engineering Journal, vol. 3, pp. 42-48, 2010.

[89] V. Aya-López, "Aplicación de la tecnología de biofiltros en un ambiente hidráulico," Universidad de Cartagena, 2012.

[90] Wikipedia, "Biofiltros," [En línea]. Disponible: <https://www.fundacionxquewiki/biofiltros>.

[Consulta: 3 mayo 2024].

[91] G. Martínez, "Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativas energéticas y gestión de residuos," *Ecosistemas*, vol. 7, no. 1, pp. 33-45, 2003.

[92] J. Quiñonez, "Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe," 2011. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.18235/0010235>.

[93] E. Hernández, "Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, pp. 11-22, 2017.

[94] R. Ronán, M. Martínez y A. Pantoja, *Manual de compostaje del agricultor*, FAO, Santiago de Chile, 2013.

[95] A. Zuluaga et al., "Determinación de factores de riesgo sanitario ambiental para recolección de residuos sólidos," *Evaluación de Impacto Ambiental*, vol. 21, no. 2, pp. 73-77, 2021.

[96] H. Botero et al., *Uruguay - Proyecto de Recuperación de Gas de Vertedero de Montevideo: evaluación de impacto ambiental*, Montevideo, 2010.

[107] G. Iglesias Rousset, "Responsabilidad por daño ambiental en Uruguay," Revista de la Facultad de Derecho, 2003.

[108] "Crisis ambiental en Colombia: El relleno sanitario y Colapso," Senado de la República, 2015.

[112] L. Ochoa, "Avances y desafíos en el reciclaje inclusivo en 12 ciudades de América Latina y el Caribe," Doc Economía Latinoamericana, vol. 3, pp. 77-89, 2017.

[115] B. Toledo, "La importancia de la gestión ambiental municipal," INVENTUM, vol. 13, no. 3, pp. 23-24, 2017.

[116] G. Arrieta, "Tarifas y financiamiento en los servicios de manejo de residuos sólidos," pp. 127-148, 2018.

[112] P. Tello-Espinoza and D. Contreras, "Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios," Avances Técnicos - Revista de Ingeniería, no. 11, Universidad de los Andes, 2012.