



**Evaluación de sostenibilidad económica, técnica y ambiental en sistemas de
compostaje municipales para el diseño de estrategias de acceso a incentivos ambientales por
aprovechamiento y reducción de GEI.**

Simón Alejandro Gallo Cifuentes

Informe de prácticas para optar el título de Ingeniero Sanitario

Práctica empresarial

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2025

Cita	(Gallo Cifuentes, 2025)
Referencia	Gallo Cifuentes, S. (2025). Evaluación de sostenibilidad económica, técnica, ambiental y social en sistemas de compostaje municipales para el diseño de estrategias de acceso a incentivos ambientales por aprovechamiento y reducción de GEI.
Estilo APA 7 (2020)	[Informe de prácticas]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

A mi padre, por pensar su vida alrededor del cariño que nos ha brindado, con su nobleza y ejemplo, mi caminar se llena de valor y sentido. Pensarte y contar con la fortuna de tu existencia me permite reconocer la pureza del amor incondicional; un amor que, aunque difícil de traducir en hechos y palabras, me inspira a vivir con coherencia en mi vida cotidiana y a poner mi trabajo al servicio de la sociedad y la búsqueda de dignidad a través de soluciones integrales.

A mi madre, por ser refugio en la incertidumbre, por darme alientos y ofrecerme alternativas cuando creí no poder con más. Recostarme a tu lado buscando calma, tus tres palmaditas suaves, repetidas con paciencia y cariño, han sido para mí un lenguaje silencioso de consuelo y ternura que me devuelven la paz y la fuerza necesaria para seguir adelante en cada propósito.

A mi hermana, cuyo brillo e inteligencia son fuente de inspiración, y a mis hermanos, por mostrarme con su sensibilidad nuevas formas de ver y sentir el mundo.

Agradecimientos

A la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - Cornare, en especial al equipo de Gestión de Residuos, por permitirme, sin saberlo, reencontrarme en estas prácticas con mi primer contacto en la universidad con las problemáticas de saneamiento ambiental y la gestión de residuos a través del compostaje. A cada operario de planta que compartió conmigo su conocimiento y experiencia para fortalecer este trabajo de grado, y a todas las personas que recibieron con respeto y voluntad de mejora cada aporte brindado de mi parte.

A la Universidad de Antioquia, por forjar mi carácter y ampliar mi comprensión de las causas justas que dignifican la vida de las personas, impulsándome hacia el trabajo multidisciplinario y hacia la búsqueda de soluciones integrales que aporten a la sociedad.

Tabla de contenido

Contenido

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	14
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. Marco teórico	15
Parámetros de calidad del compost	18
4. Metodología	21
Técnicas e instrumentos	23
4.1 Fases metodológicas.....	24
4.1.1 Seguimiento diagnóstico a la planta:.....	24
4.1.2 Evaluación económica.....	25
4.1.3 Evaluación ambiental	26
4.1.4 Revisión normativa y de mercado	26
5. Análisis de resultados.....	26
5.1 Evaluación técnico operativa	27
5.1.1 Recomendaciones estructurales iniciales	27
5.1.2 Observaciones operativas y estructurales en zonas de compostaje	32
.....	39
5.2 Evaluación económica.....	48

5.2.1	Composición de los residuos.....	49
5.2.2	Costos de operación	51
5.2.3	Venta de subproductos	56
5.2.4	Revisión normativa y de mercado para el fortalecimiento empresarial	58
5.3	Evaluación ambiental	72
5.3.1	Factores de emisión para compostaje.....	73
5.3.2	Factor de emisión por residuos dispuestos en relleno sanitario	75
5.3.3	Potencial de calentamiento global.....	80
5.3.4	Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero – GEI.....	81
5.3.5	Resultados	82

Lista de tablas

Tabla 1 Reportes de ingreso de material orgánico a planta de compostaje.....	49
Tabla 2 Costos operativos tomados para el año 2025	51
Tabla 3 Parámetros de entrada para la evaluación económica de la planta de compostaje del municipio de Marinilla	51
Tabla 4 Costos de recepción, almacenamiento, selección y desembolso de material orgánico	52
Tabla 5 Costos de monitoreo de módulos	53
Tabla 6 Costos de vaciado y aseo de módulos de aireación forzada.....	54
Tabla 7 Costos de triturado y cernido de material	54
Tabla 8 Costos de empaque y amarre por bulto	55
Tabla 9 Costos de almacenamiento del abono por bulto.....	55
Tabla 10 Costos de producción por mano de obra para un módulo de aireación forzada	55
Tabla 11 Costos de mano de obra y costales como insumo	56
Tabla 12 Fuentes de recursos para el desarrollo de proyectos de tratamiento de residuos en Colombia	71
Tabla 13 Indicadores de generación y aprovechamiento de residuos del municipio de Marinilla (2023)	72
Tabla 14 Factores de emisión por defecto para las emisiones de CH ₄ y N ₂ O procedentes del tratamiento biológico de residuos	74
Tabla 15 Factores de emisión del compostaje.....	75
Tabla 16 Composición de residuos adoptada para municipios de referencia de la jurisdicción Cornare	77
Tabla 17 Factores de oxidación para disposición final de residuos solidos.....	78
Tabla 18 Clasificación y factores de corrección de metano (FCM).....	79
Tabla 19 Factor de emisión de residuos dispuestos en relleno sanitario.....	80
Tabla 20 Valores de Potencial de Calentamiento global.....	80
Tabla 21 Resultados de emisiones supuestas por disposición en relleno, emisiones por compostaje y emisiones evitadas por tratamiento de residuos orgánicos	83

Lista de figuras

Figura 1 . Requisitos específicos para abonos orgánicos según la NTC 5167:2022.....	19
Figura 2 Pisos rígidos en zona de compostaje.....	28
Figura 3 Cubiertas en zona de compostaje.....	28
Figura 4 Cerramiento en zona de compostaje	29
Figura 5 Aspecto de compost resultante	31
Figura 6 Canales de recolección de lixiviados	31
Figura 7 Módulos de aireación convectiva	32
Figura 8 Taponamiento de tubería de aireación en modulo de aireación convectiva	33
Figura 9 Exceso de temperatura en módulo de aireación convectiva	34
Figura 10 Modalidades de volteo según número de pilas (replicable en módulos de aireación convectiva)	35
Figura 11 Uso de maquinaria en sistemas deficientes de aireación forzada	36
Figura 12 Sistema compartido de evacuación de lixiviados y aireación forzada.....	37
Figura 13 Taponamiento de sistemas de aireación y purga de lixiviados	38
Figura 14 Zona de encharcamiento por acumulación de lixiviados.....	39
Figura 15 Optimización para el drenaje de lixiviados.....	39
Figura 16 Huecos en pilas de compostaje para mejorar la distribución de aire	40
Figura 17 Acumulación de subproducto en zona de maduración	41
Figura 18 Planta con capacidad limitada por espacio y secuencia de procesos	42
Figura 19 Planta de compostaje con interferencias de flujo.....	42
Figura 20 Zona subutilizada con módulos de aireación convectiva.....	43
Figura 21 Tejas traslucidas para favorecer el proceso de maduración.....	44
Figura 22 Influencia de entrada de luz por tipo de cubierta.....	44
Figura 23 Efecto de gotera sobre pila del compost	45

Figura 24 Módulos con alto contenido de humedad por falta de material seco estructurante	46
Figura 25 Ingreso de vectores y aves por falta de cerramiento perimetral	47
Figura 26 Composición de residuos dispuestos en planta de compostaje	50
Figura 27 Residuos no orgánicos encontrados en la jornada de recepción de residuos orgánicos	50
Figura 28 Categorías de Negocios Verdes	66
Figura 29 Clasificación del compost como Ecoproducto industrial	67
Figura 30 Escenario de relleno sanitario: emisiones generadas y evitadas por compostaje	83

Siglas, acrónimos y abreviaturas

IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ESP	Empresa de Servicios públicos
PGIRS	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos
IAT	Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos
ODS	Objetivos de Desarrollo sostenible
NTC	Norma Técnica Colombiana
RAS	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario

Resumen

Este trabajo de grado se desarrolló en el marco de las prácticas profesionales en Cornare y tuvo como propósito evaluar la sostenibilidad técnica, económica y ambiental de los sistemas de compostaje vinculados al programa MejorAgro, con el fin de generar insumos que orienten la toma de decisiones en la gestión regional de residuos orgánicos. La metodología incluyó visitas de campo a las plantas de compostaje de la jurisdicción, entrevistas con operarios, revisión documental y aplicación de lineamientos del RAS 2000 y del IPCC 2006.

En el componente técnico se caracterizaron las fases de operación de las plantas (recepción, clasificación, llenado de módulos, monitoreo, vaciado, trituración, cernido, empaque y almacenamiento), identificando fortalezas como la existencia de infraestructura básica, la replicabilidad del modelo, la disminución de la presión sobre el relleno sanitario y el aumento en las metas de aprovechamiento. Entre las limitaciones se señalaron la ausencia de mediciones periódicas que permitan establecer parámetros de control y avanzar hacia la estandarización, así como la falta de lineamientos técnicos continuos que fortalezcan la gestión ante la rotación de personal.

El análisis económico se centró en la planta de Marinilla, donde por cada módulo de 40 toneladas se obtiene un aprovechamiento del 35 %, equivalente a 300 bultos de 40 kg. El costo de producción por bulto se ubicó entre \$7.017 y \$7.186, frente a un precio de \$12.000, con un margen operativo del 40–42 %.

En la dimensión ambiental se evidenció que el compostaje reduce más del 80 % de las emisiones de GEI respecto a la disposición en relleno sanitario, confirmando su potencial de mitigación y su aporte a la economía circular.

Palabras clave: Gestión de residuos, aprovechamiento de residuos orgánicos, compostaje, emisiones de gases de efecto invernadero, sostenibilidad

Abstract

This undergraduate thesis was developed within the framework of professional practice at Cornare and aimed to evaluate the technical, economic, and environmental sustainability of composting systems linked to the MejorAgro program, in order to generate inputs to guide decision-making in the regional management of organic waste. The methodology included field visits to composting plants in the jurisdiction, interviews with operators, document review, and the application of guidelines from RAS 2000 and IPCC 2006.

In the technical component, the operational phases of the plants (reception, classification, module filling, monitoring, emptying, shredding, sieving, packaging, and storage) were characterized, identifying strengths such as the existence of basic infrastructure, the replicability of the model, the reduction of pressure on the landfill, and the increase in utilization targets for organic waste. Among the limitations, the lack of periodic measurements to establish control parameters and advance standardization was noted, as well as the absence of continuous technical guidelines to strengthen management in the face of staff turnover.

The economic analysis focused on the Marinilla plant, where each 40-ton module achieves a 35% recovery, equivalent to 300 compost bags of 40 kg. The production cost per bag was estimated between COP \$7,017 and \$7,186, compared to a selling price of COP \$12,000, resulting in an operating margin of 40–42%.

From the environmental perspective, it was found that composting reduces more than 80% of GHG emissions compared to landfill disposal, confirming its mitigation potential and contribution to the circular economy.

Keywords: Waste management, Organic waste utilization, Municipal waste composting, Greenhouse gas emissions, Sustainability

1. Introducción

La transición hacia los modelos de gestión ambiental, los sistemas de tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos, junto a su alta representatividad en la generación cobra relevancia en contextos y municipios donde la disposición en rellenos sanitarios no ofrece una alternativa sostenible y circular al uso de los residuos que se producen. Desde dicho contexto, se realizó la práctica académica en la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Rios Negro y Nare (Cornare) donde una de las actividades desempeñadas se desarrolló en función del programa Mejoragro, estrategia realizada con el fin de orientar la promoción del compostaje municipal, el enfoque circular en la gestión de los residuos y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

La promoción del cierre de ciclos de la materia orgánica, la reducción de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, como la generación de abonos para el uso local ha documentado avances significativos, sin embargo, persisten desafíos en torno a la sostenibilidad técnica, económica y ambiental de diversas composteras administradas por las Empresas de Servicios Públicos (ESP) municipales que relacione la reducción de materia orgánica con la elaboración de un compost de forma eficiente que cumpla con los requerimientos de calidad, como también la reducción de emisiones de GEI.

Desde esta perspectiva, se desarrolló una revisión y evaluación a diferentes plantas de compostaje de la jurisdicción Cornare para establecer una hoja de ruta que permita relacionar el aprovechamiento orgánico no solo con el cumplimiento de las metas desarrolladas en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) municipales, sino también de calidad de compost y reducción verificable de GEI como instrumento para el acceso a instrumentos institucionales o de mercado identificando condiciones que permitan el acceso de Empresa de Servicios Públicos a instrumentos como el Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos (IAT), programas voluntarios y alianzas que reconocen el potencial del valor climático de estas iniciativas. Además, esta revisión y evaluación no solo buscar identificar el estado actual frente al cumplimiento normativo y ambiental, sino también aspectos deficientes y practicas destacables que sirvan como instrumento de replicabilidad y mejora en otras composteras municipales o

comunitarias de la región, favoreciendo procesos de estandarización, transferencia de conocimientos y optimización de procesos en escenarios con menores niveles de desarrollo o con mayores dificultades operativas, contribuyendo a la consolidación de un modelo regional que promueva la eficiencia en el manejo de residuos orgánicos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la sostenibilidad económica, técnica y ambiental de los sistemas y productos de compostaje municipales del programa Mejoragro impulsado por Cornare, con el fin de generar estrategias para el acceso a incentivos ambientales vinculados a la disminución de GEI y aprovechamiento de residuos.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar inspecciones técnicas y operacionales a las instalaciones de compostaje, considerando aspectos de infraestructura, procesos, producto generado y su manejo.
- Evaluar la sostenibilidad económica de los sistemas de compostaje, con base en los ingresos por comercialización del producto y su potencial de crecimiento.
- Medir los impactos ambientales, sociales e institucionales generados por el compostaje, incluyendo la reducción de emisiones, los usos del compost, la aplicación del mismo y el acceso a incentivos ambientales.

3. Marco teórico

En Colombia, según el Instituto Colombiano Agustín Codazzi, la proporción de hogares con acceso a servicio de aseo y recolección a nivel nacional corresponde a un 82,6 %, concentrado principalmente en las cabeceras municipales (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2023). Sin embargo, el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos señala que la mayoría de los rellenos sanitarios presentan fallos o diseños inadecuados en su

funcionamiento o en su capacidad remanente (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2023).

Dentro de este panorama, los residuos orgánicos adquieren especial relevancia: su aprovechamiento permite prolongar la vida útil de los rellenos y disminuir la generación de lixiviados y contaminantes que afectan el medio ambiente. En este sentido, las agendas internacionales de sostenibilidad, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), resaltan la importancia de transitar hacia modelos circulares. De manera particular, los ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) plantea que los entornos urbanos deben contar con servicios públicos adecuados, entre ellos la gestión de residuos como condición necesaria para mejorar la salud y calidad de vida de la población, reduciendo al mismo tiempo los impactos negativos sobre el ambiente. Por su parte, el ODS 12 (Producción y consumo responsables) pretende garantizar un uso sostenible de los recursos naturales, impulsando la reducción en la generación de desechos, su circularidad y valorización a través de prácticas como la reutilización, reciclaje y aprovechamiento de la fracción orgánica reconocen la gestión adecuada de los residuos como parte esencial de la sostenibilidad urbana (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Estos cambios requieren no solo transformaciones técnicas, sino también una visión corporativa para la administración económica de los residuos. Según Marmolejo et al. (2009), el conocimiento de las cantidades y propiedades de los residuos sólidos es fundamental para diseñar estrategias de aprovechamiento efectivas, identificar falencias y abrir oportunidades de valorización en sectores productivos, energéticos y ambientales.

En términos ambientales, el compostaje se presenta como una alternativa frente a la disposición en rellenos sanitarios. Mientras la descomposición anaerobia en estos sitios produce metano con un potencial de calentamiento global 80 veces superior al del CO₂ en un periodo de 20 años (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2022), el compostaje reduce estas emisiones y aporta un abono orgánico de utilidad agrícola. Sin embargo, su implementación en cadenas productivas se ve limitada por la falta de inversión, capacitación y mantenimiento de plantas, lo que dificulta los procesos de certificación que garantizarían la confianza en el producto final.

En Colombia, la normatividad reconoce su importancia. La Ley 142 de 1994 obliga a las entidades prestadoras de servicios públicos a presentar alternativas para la gestión integral de los residuos. Más recientemente, el Decreto 802 de 2022 creó incentivos para proyectos municipales que incorporen el compostaje, programas de aprovechamiento y control del medio ambiente en sus Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). No obstante, más allá de los marcos normativos, es indispensable la voluntad política, el respaldo financiero y el compromiso ético, social y ambiental para garantizar la sostenibilidad de estas iniciativas.

En este contexto, el Acuerdo No. 362 de Cornare planteó el aprovechamiento del 80 % de los residuos orgánicos e inorgánicos generados en la jurisdicción (más de 12.000 toneladas mensuales), mediante la adquisición de sistemas de compostaje de aireación convectiva y forzada, con capacidades de 1.650 toneladas por compostador en el caso de los convectivos y de 35 - 40 toneladas en los de aireación forzada (Cornare, 2017). A estas acciones se sumó la entrega de insumos y equipos como molinos de martillo, máquinas cerradoras de costales, básculas y termómetros para fortalecer el proceso.

El compostaje, como proceso biológico de estabilización, aprovecha la biodegradabilidad de los residuos orgánicos (de cosecha, vegetales, restos de cocina, entre otros) y los transforma en un producto capaz de mejorar las características físicas y biológicas del suelo, incrementando la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de nutrientes (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2023) Para ello, las plantas de compostaje deben contar con unidades mínimas como: zona de recepción y descargue, área de mezcla y conformación de pilas o módulos, zona de maduración y área de empaque y almacenamiento. Estas deben cumplir requisitos básicos: ubicación en suelos compatibles con los POT/EOT, accesibilidad, pisos impermeables, cerramientos que eviten el ingreso de animales, cubiertas para el control climático y sistemas de conducción de lixiviados hacia tanques de almacenamiento.

En cuanto a las fases del proceso, se distinguen tres principales: fase mesófila, fase termófila y fase de maduración. En la primera (hasta 35 °C) predominan microorganismos que degradan compuestos simples de carbono y nitrógeno, generando ácidos orgánicos y reduciendo el pH

(Docampo, 2013). Durante la fase termófila, el aumento paulatino de temperatura hasta estar por encima de a 55 °C, permite la destrucción de patógenos y la inactivación de semillas de malezas, además de favorecer la degradación de proteínas en compuestos nitrogenado más simples. Posteriormente, en la fase de maduración, el material regresa a condiciones mesófilas, estabilizándose en términos de pH y temperatura, con una reducción en la actividad microbiana. Estos procesos resultan fundamentales para asegurar tanto la inocuidad como la calidad del producto final (Empresas Públicas de San Rafael S.A ESP, s. f.; Román et al., 2013).

En cuanto a la mezcla, se recomienda una relación de material fresco y seco cercana a 3:1. Los residuos secos (aserrín, viruta, hojarasca, madera triturada) contribuyen a regular la humedad y mejorar la relación C/N, la cual debe mantenerse en un rango óptimo de 25–30:1. El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2015) propone como referencia, para una tonelada de residuos, un equilibrio de 500 kg de materiales ricos en carbono y 400 kg de materiales ricos en nitrógeno, con posibilidad de adicionar microorganismos mediante insumos autorizados (melaza, vinaza, guarapo o cachaza).

Parámetros de calidad del compost

La calidad del compost producido debe cumplir con requisitos específicos para garantizar su aceptación comercial y su seguridad ambiental. La Norma Técnica Colombiana NTC 5167:2022 establece parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de contaminantes que los productos deben cumplir para ser utilizados como abonos o enmiendas agrícolas.

Figura 1

. Requisitos específicos para abonos orgánicos según la NTC 5167:2022

Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros a caracterizar (Criterios de clasificación del producto)	Parámetros a garantizar (en base húmeda)												
Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos separados en la fuente o mezcla de los anteriores, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican.	- Pérdidas por volatilización %* - Contenido de cenizas máximo 60 %* - Contenido de humedad: * - Para materiales de origen animal Máximo 20 % - Para materiales de origen vegetal, máximo 30 % - Para mezclas el contenido de humedad deberá ponderarse en proporción a la mezcla - Contenido de carbono orgánico oxidable total, mínimo 15 % - N, P₂O₅, K₂O, totales (reportarlos si cada uno es mayor de 1 %) - Contenido de sílice total expresado como SiO₂, máximo: 50 % del contenido de cenizas - Relación C/N - Capacidad de Intercambio Catiónico, mínimo 30 cmol(+)kg⁻¹ (meq/100g) - Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso - pH mayor de 4 y menor de 9 - Densidad real máxima (en base seca) 0,6 g/cm³ - Límites máximos en mg/kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación:<table><tr><td>Arsénico (As)</td><td>41</td></tr><tr><td>Cadmio (Cd)</td><td>39</td></tr><tr><td>Cromo (Cr)</td><td>1 200</td></tr><tr><td>Mercurio (Hg)</td><td>17</td></tr><tr><td>Níquel (Ni)</td><td>420</td></tr><tr><td>Plomo (Pb)</td><td>300</td></tr></table> - Se debe indicar la materia prima de la cual procede el producto * La suma de estos parámetros debe ser 100.	Arsénico (As)	41	Cadmio (Cd)	39	Cromo (Cr)	1 200	Mercurio (Hg)	17	Níquel (Ni)	420	Plomo (Pb)	300	- Contenido de carbono orgánico oxidable total (%C) - Contenido de humedad (%) - Contenido de cenizas (%) - Capacidad de Intercambio Catiónico, cmol(+)kg⁻¹ (meq/100g) - Capacidad de retención de humedad (%) - pH - Contenido de nitrógeno total (%N) (si el contenido es mayor de 1 %) - Densidad (g/cm³) - Contenido de metales pesados (mg/kg) - Contenido de sílice total como SiO₂ - Contenido de fósforo total (%P₂O₅) (si el contenido es mayor de 1 %) - Contenido de potasio total (K₂O) (si el contenido es mayor de 1 %)
Arsénico (As)	41													
Cadmio (Cd)	39													
Cromo (Cr)	1 200													
Mercurio (Hg)	17													
Níquel (Ni)	420													
Plomo (Pb)	300													

Nota. Fuente NTC 5167:2022.

Estos criterios permiten verificar la madurez y la inocuidad del compost, asegurar que no existan riesgos para el suelo o los cultivos y facilitar la certificación de calidad exigida por el ICA para su comercialización.

La evaluación económica de sistemas de compostaje constituye un componente fundamental para determinar su viabilidad y sostenibilidad en el tiempo. Más allá de los beneficios ambientales asociados a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al cierre de ciclos de nutrientes, es indispensable establecer si los proyectos son capaces de sostenerse financieramente, generar ahorros frente a la disposición en relleno sanitario y, en algunos casos, producir ingresos adicionales a través de la comercialización de subproductos. En este sentido, la literatura y la normatividad nacional ofrecen lineamientos que permiten estructurar los análisis económicos de plantas de aprovechamiento de residuos orgánicos.

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS (2000) establece que todo proyecto de aprovechamiento y valorización debe demostrar su viabilidad socioeconómica, técnica, financiera y ambiental. Entre los aspectos mínimos a considerar se encuentran: la realización de un estudio de mercado (oferta, demanda, precios y frecuencia de venta), el análisis de viabilidad financiera y comercial (que incorpore los costos de separación en la fuente, recolección, transporte selectivo, transformación, embalaje y comercialización), y la identificación de beneficios ambientales y sociales. Asimismo, el RAS plantea la necesidad de realizar estudios de factibilidad que aborden, de manera integral, los costos de capital, los costos de operación y los ingresos por venta de subproductos. De esta manera, se reconoce que el compostaje, como cualquier actividad productiva, debe sustentarse en un balance entre gastos e ingresos.

En términos de análisis económico, los costos de una planta de compostaje suelen clasificarse en tres grandes grupos: costos fijos, costos operativos (o variables) y mano de obra. Los costos fijos corresponden a aquellos que se mantienen independientemente del nivel de operación, tales como la depreciación de la infraestructura y equipos, los seguros, los impuestos y, en algunos casos, los gastos administrativos o de vigilancia. Los costos operativos son aquellos que varían directamente con la producción y el tiempo de uso de los equipos, e incluyen el consumo de energía eléctrica, agua, insumos directos como el aserrín o los sacos para el empaque, el mantenimiento preventivo y correctivo, así como la disposición de los residuos no aprovechables. Finalmente, los costos de mano de obra abarcan los salarios de los operarios, sus prestaciones sociales, aportes patronales y, en algunos casos, la supervisión prorrateada del personal administrativo.

A estos componentes debe añadirse el concepto de costos evitados, entendido como el ahorro que se produce al no disponer la fracción orgánica de los residuos en un relleno sanitario. La disposición en rellenos implica gastos de transporte, tarifa de disposición y, en ocasiones, tasas ambientales por vertimientos o emisiones. En consecuencia, cuando un municipio implementa el compostaje, logra reducir significativamente estos costos, generando un beneficio económico indirecto que complementa los ingresos por la venta del compost. Diversos estudios señalan que

esta visión integral permite dimensionar de manera más justa la contribución económica del compostaje, ya que no solo se trata de los ingresos de mercado, sino también de los ahorros en el sistema de gestión de residuos.

La venta de subproductos representa otro eje central de la evaluación económica. En el caso del compost, su valor en el mercado depende de factores como la calidad física y química del producto, la demanda en el sector agrícola, la presentación en bultos y la capacidad de la planta para cumplir con los requisitos de registro y certificación, como los establecidos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Al contar con análisis fisicoquímicos y microbiológicos que respalden la calidad del abono, se incrementa su potencial de aceptación comercial y su valor en el mercado. Según experiencias reportadas en diferentes municipios de Colombia, el precio de un bulto de compost de 40 kg oscila entre 10.000 y 15.000 pesos, lo cual constituye un punto de referencia para estimar la rentabilidad de la actividad.

Finalmente, debe considerarse que el compostaje no solo genera beneficios económicos directos, sino que también se enmarca dentro de los principios de la economía circular y el desarrollo sostenible. Al transformar los residuos orgánicos en un insumo agrícola, se reduce la presión sobre los rellenos sanitarios, se sustituyen parcialmente fertilizantes químicos y se promueve la generación de empleo local. Estos aspectos, si bien no siempre se traducen en valores monetarios inmediatos, refuerzan la justificación económica y social de los proyectos de compostaje y respaldan la necesidad de evaluarlos bajo un enfoque integral que combine lo financiero, lo ambiental y lo social.

4. Metodología

La metodología de investigación adopta un enfoque combinado, ya que tanto las variables cualitativas como cuantitativas son cruciales para el desarrollo de la evaluación de las plantas de compostaje. Esto se debe a que la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero también se ve afectada por el óptimo desarrollo del compost- (IPCC, 2006).

Los procedimientos internos de la planta forman parte del progreso cualitativo en el monitoreo técnico, mediante entrevistas y preguntas organizadas al personal responsable de su funcionamiento, enfocados en la eficiencia y calidad del compostaje, con el objetivo de valorar elementos vinculados a los protocolos de compostaje y problemas en la satisfacción de requisitos para su potencial certificación. La recolección de datos sobre la cantidad de residuos orgánicos producidos y tratados, su acogida y gestión, periodos de compostaje y maduración mediante formularios técnicos que incluyen un análisis cuantitativo facilitará la elaboración de la estimación de disminución de emisiones según las metodologías propuestas por las Directrices del IPCC 2006 para los inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, Volumen 5 – Desechos, Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos; utilizando los factores de emisión y potenciales de calentamiento de referencia con un análisis cuantitativo de los datos mediante hojas de cálculo (IPCC, 2006) y la búsqueda de fuentes primarias relacionadas a estudios anteriores en el campo por parte de Cornare u otros.

La metodología empleada para el análisis económico de la planta de compostaje de Marinilla se fundamenta en los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2000), en particular en lo referente a los estudios de factibilidad y a la evaluación de los costos de operación y la venta de subproductos. En coherencia con el alcance de este trabajo de grado, se decidió centrar el análisis en dos componentes principales: (i) los costos de operación, entendidos como los requerimientos de mano de obra y el uso de insumos directos en las diferentes etapas del proceso de compostaje, y (ii) los ingresos asociados a la venta de subproductos, con énfasis en el compost producido. No se incluyó el análisis de costos de capital, ya que la infraestructura y los equipos fueron suministrados previamente por Cornare en el marco de convenios interadministrativos, lo que limita la posibilidad de estimar una inversión inicial propia del municipio.

La recolección de información se desarrolló a partir de dos fuentes. Como fuente secundaria, se consultaron informes técnicos y documentos oficiales de Cornare, entre ellos el convenio interadministrativo de asociación No. 21as113b0053 (2023), en el que se detallan los equipos suministrados a las plantas municipales de compostaje de la jurisdicción, la asistencia técnica y la dotación de insumos. Como fuente primaria, se realizaron entrevistas y consultas

directas con el encargado de la planta, así como observaciones en campo, que permitieron obtener datos sobre la organización del personal, los tiempos de trabajo, los registros de monitoreo y las fases de procesamiento. De esta manera fue posible contrastar la información documental con la evidencia empírica, aclarando inconsistencias y ajustando los tiempos de referencia a valores medidos en la operación real.

En cuanto al procedimiento de cálculo, se adoptó un enfoque basado en la estimación de costos por módulo de compostaje y por unidad de producto (bulto de 40 kg). Para ello se definieron los parámetros de entrada: capacidad de cada módulo, porcentaje de aprovechamiento, producción útil en bultos y salario mínimo legal mensual vigente (SMMLV 2025), convertido en valor hora-hombre. Posteriormente se identificaron las principales etapas del proceso productivo: (i) recepción, clasificación y llenado de módulos; (ii) monitoreo de las pilas; (iii) vaciado y aseo de los módulos; (iv) triturado y cernido; (v) empaque y amarre; y (vi) almacenamiento. Para cada etapa se calcularon las horas-hombre (HH) mediante el número de operarios, el tiempo requerido y el número de recepciones o bultos, según correspondiera. El costo de cada actividad se obtuvo multiplicando las HH por el valor hora, y el costo total del módulo se estimó sumando todos los rubros. A partir de ello se calculó el costo unitario por bulto.

De manera complementaria, se incorporaron categorías adicionales para reflejar los costos de insumos directos (sacos, amarras, aserrín). Cuando no fue posible acceder a registros precisos, los valores se estimaron a partir de precios de mercado. Asimismo, se tuvo en cuenta que en el cernido se descarta parte del material, reduciendo la producción final a aproximadamente 300 bultos por módulo, ajuste que fue integrado en el cálculo de las fases posteriores de empaque y almacenamiento.

Técnicas e instrumentos

- Reglamentación nacional y programas en marcha.
- Registro técnico de la operación de la planta, con la anotación de datos recogidos de las visitas de seguimiento

- Conversaciones con el equipo responsable de gestionar la planta para detectar dificultades y oportunidades para conseguir la certificación del producto.
- Orientación de observación sobre la eficacia, la calidad de los equipos y las condiciones de los procesos para optimizar las prácticas de operación.
- Modelo de cálculo de emisiones considerando las especificaciones establecidas por el IPCC, utilizando factores de conversión y potenciales de calentamiento estándar, así como la revisión bibliográfica existente.

4.1 Fases metodológicas

4.1.1 Seguimiento diagnóstico a la planta:

En lo correspondiente a la caracterización de los procesos, cantidades de abono producto del compostaje, su calidad y oportunidades de mejora. Es decir, seguir operativamente el flujo de los residuos orgánicos municipales desde la llegada a la planta de tratamiento hasta su transformación como producto; esto incluye diversas etapas en las cuales se tiene en cuenta siempre el manejo de lixiviados, la superficie y cobertura de la estructura que lo contiene. Dichas zonas se clasifican en

Zona de descargue del producto:

Lugar donde se separan los residuos orgánicos de las bolsas, funciona como un acopio de entrada y almacenamiento temporal de la materia.

Zona de compostaje:

En esta zona se tienen módulos de aireación forzada o convectiva dependiendo del municipio, donde se forman las pilas con relaciones recomendadas de mezcla de material seco/húmedo y se establecen frecuencias de volteo, reportes de temperatura y relaciones de mezcla óptimas para el proceso.

Zona de maduración:

Se inspecciona la presencia del material no degradado o de gran tamaño, al ser una zona de secado, se debe realizar inspección continua del contenido de humedad y olores con una frecuencia de volteo adaptada a las características específicas del medio.

Producto final:

Se evalúa la apariencia del compost, teniendo en cuenta los parámetros de calidad y seguimiento dispuestos por la NTC 5167:2022 para el uso del compost como abono orgánico.

4.1.2 Evaluación económica

Se hace seguimiento a la comercialización o usos del compost con la idea de analizar la sostenibilidad económica del producto, integrando variables como cantidad de costales de abono producido, ventas, donaciones y usos institucionales para obtener una idea de los ingresos y posibles incentivos. Esta información se obtiene a partir de las visitas de seguimiento a las plantas con entrevistas al personal y búsqueda de reportes internos de la planta. Los componentes a observar en esta fase son:

Ingresos y búsqueda de valorización del producto

Se parte por identificar los usos actuales y potenciales del compost teniendo en cuenta las actividades económicas de los municipios o compradores potenciales de otros lugares, además de la estimación y reporte del valor de mercado en cada municipio. Se considera también el reporte de potenciales de mejora a través de encuestas al personal técnico que ponga en manifiesto las falencias en funcionamiento y apoyos requeridos, barreras en la venta del compost, acciones propuestas para su certificación y el posterior incremento en sus ventas.

4.1.3 Evaluación ambiental

Se integra la cuantificación del impacto ambiental a partir de la obtención de información primaria y secundaria de aportes en emisiones de estos sistemas de compostaje comparado con la disposición final en rellenos sanitarios, esta información tiene un enfoque basado en la metodología dispuesta por las directrices del IPCC 2006. Esta fase puede representar y proporcionar una idea clara con fundamentos para la búsqueda de incentivos climáticos (fase 5) por la reducción de GEI.

4.1.4 Revisión normativa y de mercado

Se identifican las oportunidades y barreras para el acceso a incentivos a través de información de programas institucionales existentes relacionados con el aprovechamiento de residuos y reducción de GEI. Esta fase se elabora haciendo una búsqueda de las disposiciones regulatorias que aplican en la gestión de residuos, tales como los instrumentos de aprovechamiento tarifario (IAT) y metas de aprovechamiento en los PGIRS municipales.

5. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo de esta evaluación corresponden a una inspección integral de los sistemas de compostaje municipales de la jurisdicción Cornare. Este análisis evalúa el desempeño técnico, económico, ambiental, normativo y de mercado de estas plantas teniendo como finalidad la identificación de fortalezas y debilidades que se traduzcan en implementar estrategias que se interpreten como oportunidades para mejorar la calidad del producto y la eficiencia en los procesos y a partir de esto facilitar la inserción a esquemas de incentivos y mercados verdes en coherencia con los objetivos de gestión integral de residuos y la transición hacia modelos de circularidad.

La exposición busca resaltar aprendizajes y lineamiento que puedan ser útiles para municipios y otros entes interesados en consolidar proyectos de compostaje replicables a través del hallazgo de falencias y mejoras, combinando diagnóstico y prospectiva para el posicionamiento de las plantas de compostaje en el marco de la economía verde de la región.

5.1 Evaluación técnico operativa

La siguiente evaluación corresponde a una revisión general de los hallazgos observados en las plantas de compostaje de la jurisdicción, partiendo de las visitas, entrevistas y observaciones directas realizadas en cada una de ellas. No se expone de manera individual cada planta, en la medida en que comparten múltiples características en cuanto a su infraestructura, procesos y dinámicas operativas. En general, se evidencian prácticas de manejo adecuadas y una estructura básica que responde a los lineamientos técnicos establecidos, sin embargo, también se identifican asuntos puntuales que requieren optimización y ajustes operativos que, de ser implementados, podrían mejorar la eficiencia del proceso, la calidad del producto final y la sostenibilidad de las composteras en el tiempo. Esta evaluación busca, por tanto, resaltar tanto las buenas prácticas replicables como las oportunidades de mejora que, en conjunto, fortalecen el modelo de aprovechamiento de residuos orgánicos en la región.

5.1.1 Recomendaciones estructurales iniciales

Zona de compostaje

Pisos:

Se recomienda disponer de pisos rígidos que eviten la contaminación del suelo por lixiviación. Estas losas de concreto deben impermeabilizarse y recibir mantenimiento periódico. En caso de fisuras, es necesario sellarlas con mortero, resina o algún sellador impermeabilizante que impida filtraciones. También es clave garantizar pendientes adecuadas para que los lixiviados fluyan hacia las cunetas y no se estanquen, evitando así olores ofensivos y asegurando su conducción hacia el tanque de almacenamiento. Como medida complementaria, la aplicación de materiales absorbentes como aserrín o paja ayuda a controlar excesos de humedad y lixiviados superficiales.

Figura 2

Pisos rígidos en zona de compostaje



Cubierta:

En las estructuras de madera, el mantenimiento preventivo es esencial para proteger los elementos contra insectos y hongos que comprometen su vida útil. El control periódico de filtraciones, traslapes y goteras, así como la reposición de piezas en mal estado, asegura la funcionalidad de la cubierta. De igual manera, para mejorar la eficiencia del proceso de compostaje, resulta conveniente la instalación de tejas en policarbonato, que permiten un mayor ingreso de luz natural sin comprometer la protección contra la lluvia.

Figura 3

Cubiertas en zona de compostaje



Cerramiento:

En algunos casos se observa el uso de plásticos como cerramiento. Si bien esto puede ayudar a reducir la propagación de olores, existen soluciones más adecuadas; el uso de mallas permite impedir la entrada de vectores o aves carroñeras sin obstaculizar el flujo de aire, lo que hace más eficiente el proceso. El volteo periódico de las pilas evita la formación de zonas anaerobias y, por ende, la emisión de olores desagradables. Asimismo, la limpieza y el mantenimiento de los cerramientos son necesarios para conservar su funcionalidad, sustituyendo los materiales deteriorados cuando corresponda.

Figura 4
Cerramiento en zona de compostaje



Zona de maduración

Pisos:

En esta zona la presencia de lixiviados y humedad suele ser menor debido a la aireación constante, las temperaturas alcanzadas en las fases anteriores y el drenaje a través de canaletas. No obstante, se recomienda contar con pisos rígidos o alternativas constructivas que prevengan deterioros a futuro, especialmente en áreas con pendientes moderadas donde podría infiltrarse humedad que afecte la calidad del producto en seco.

Cubierta:

El buen estado de la cubierta es igualmente prioritario, garantizando que no existan filtraciones ni humedades. Se recomienda un mantenimiento programado para prolongar su vida útil y reducir la aparición de averías, aplicando inmunizantes en las estructuras de madera para incrementar su durabilidad. Al igual que en la zona de compostaje, la instalación de tejas en policarbonato favorece el ingreso de luz natural, aspecto que optimiza el proceso de secado.

Cerramiento

Dado que en esta fase el material requiere aireación y exposición controlada para alcanzar condiciones de secado óptimas, se sugiere emplear cerramientos con malla que faciliten la entrada de luz y permitan un flujo de aire adecuado. Esta medida mejora la eficiencia del proceso y disminuye riesgos de humedad excesiva.

Zona de molido y empaque del material

En esta etapa final se mantienen las condiciones estructurales básicas señaladas en las zonas anteriores. No obstante, debe considerarse que los materiales procesados en esta fase presentan una granulometría fina, susceptible a ser arrastrada por corrientes de aire. Por esta razón, se recomienda valorar la instalación de medidas correctoras como barreras físicas, muros o mallas plásticas, asegurando su mantenimiento constante y el reemplazo oportuno de los elementos que presenten deterioro.

Figura 5

Aspecto de compost resultante



Lixiviados provenientes de cada proceso

De manera transversal a todas las zonas, la gestión de lixiviados es un aspecto crítico. Se recomienda la instalación de tuberías internas en PVC que recolecten y conduzcan los lixiviados hacia tanques de almacenamiento, evitando encharcamientos y retrasos en los procesos por acumulación en la base de las pilas. Una alternativa complementaria consiste en implementar un sistema de recirculación de lixiviados sobre las pilas, evaluando parámetros como pH, temperatura, nutrientes, humedad y sólidos, lo que permitiría explorar su utilidad en la aceleración del proceso de compostaje y mejorar la eficiencia operativa.

Figura 6

Canales de recolección de lixiviados



5.1.2 Observaciones operativas y estructurales en zonas de compostaje

Módulos de aireación convectiva:

Su configuración permite considerarlos como un sistema cerrado o en recipiente. Estos módulos presentan ventajas en comparación con los de aireación forzada: almacenan cantidades adecuadas de material, facilitan las labores de volteo, permiten una extracción más sencilla de lixiviados y contribuyen al control de vectores como roedores y aves. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentra la tendencia a alcanzar temperaturas elevadas, lo que hace indispensable un control riguroso de los parámetros operativos. En climas cálidos, es común adicionar tierra (hasta un 10%) al interior del recipiente, ya que este material actúa como regulador térmico debido a su estabilidad y a que no genera calor adicional (Román et al., 2013).

En la práctica, los módulos de aireación convectiva cuentan con dimensiones aproximadas de 1,80 m de altura, 1,25 m de largo y 1,25 m de ancho, con una capacidad de carga cercana a 1.650 kg de material orgánico. Se recomienda no llenarlos completamente, ya que el peso y el volumen del material pueden compactar las zonas inferiores, generando condiciones anaerobias responsables de malos olores.

Figura 7
Módulos de aireación convectiva



Nota. Fuente Informes Técnicos Cornare.

Se evidencia además que algunos módulos no cuentan con un uso adecuado de las tuberías centrales, lo que limita la aireación homogénea del material. En muchos casos se observaron taponamientos en los orificios de estas tuberías, situación que interfiere con el proceso de compostaje. Para evitarlo, se recomienda instalar costales o mallas que impidan la obstrucción de los orificios de aireación convectiva.

Figura 8

Taponamiento de tubería de aireación en módulo de aireación convectiva



Un hallazgo recurrente es la acumulación excesiva de humedad en las partes bajas, lo cual se asocia al taponamiento de los orificios y a la falta de volteo adecuado. En paralelo, se identificó que en varios lugares las temperaturas superan los rangos recomendados. Se debe recordar que la sanitización del producto se logra con temperaturas superiores a 55 °C, necesarias para eliminar microorganismos patógenos, y que la desactivación de semillas de malezas ocurre alrededor de los 60 °C. No obstante, exceder los 70–75 °C durante la fase termófila resulta contraproducente, ya que la mayoría de los microorganismos no sobrevive a estas condiciones, interrumpiendo el proceso de descomposición (Docampo, 2013). Este fenómeno suele indicar un exceso de nitrógeno en la pila; entre las medidas correctivas se encuentran la adición de materiales ricos en carbono, la reducción del tamaño de la pila y la apertura de orificios para favorecer el enfriamiento.

Figura 9

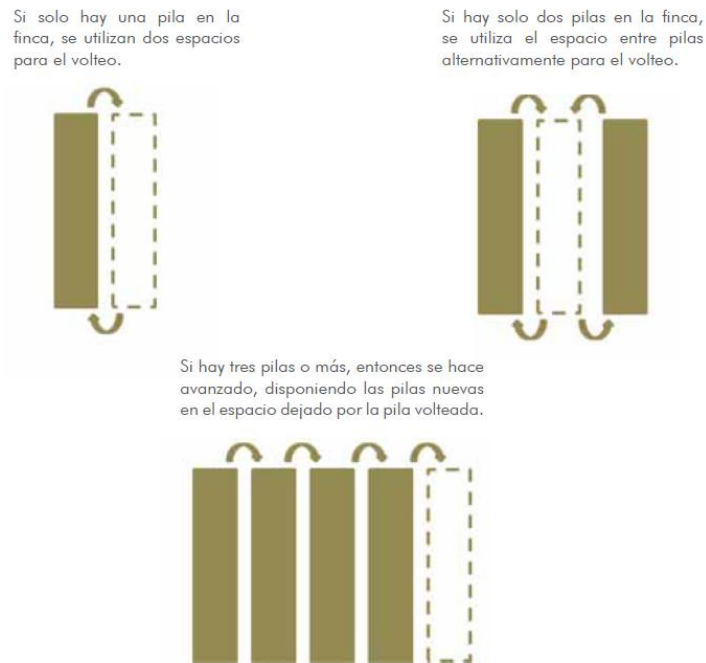
Exceso de temperatura en módulo de aireación convectiva



Para mitigar estos problemas, se recomienda establecer frecuencias claras de volteo que involucren la totalidad de la biomasa, garantizando aireación homogénea y reduciendo la formación de zonas anaerobias. En composteras con capacidad instalada superior a la cantidad de material disponible, puede considerarse un esquema de operación que utilice módulos alternos, dejando uno vacío para trasladar el material en estabilización desde el módulo anterior. Si bien esta práctica mejora la aireación, también implica mayor demanda de mano de obra y un incremento en costos y tiempos, especialmente porque los operarios suelen tener responsabilidades adicionales en el servicio público de aseo.

Figura 10

Modalidades de volteo según número de pilas (replicable en módulos de aireación convectiva)



Nota. Fuente (Román et al., 2013).

Respecto a la frecuencia del volteo, no existe un estándar universalmente definido, lo que refuerza la necesidad de implementar un monitoreo constante y parametrizado que permita estandarizar procesos a futuro. Sin embargo, el RAS 2000, Título F sobre sistemas de aseo urbano, incluye recomendaciones aplicables al compostaje municipal en cuanto a frecuencia de aireación:

- Con humedad entre el 50 % y 60 %, se recomienda volteo cada dos días, alcanzando un total de 4 a 5 volteos.
- Si la humedad está entre el 40 % y 50 %, el volteo debe realizarse cada tres días, con un total de 3 a 4 volteos.
- Cuando la humedad desciende por debajo del 40 %, debe adicionarse agua o incorporar material húmedo triturado, asegurando una mezcla homogénea.
- Si la humedad supera el 60 %, la pila debe voltearse diariamente hasta reducirla por debajo de ese umbral. En este caso también se aconseja adicionar material estructurante triturado y homogenizar; una vez estabilizado el contenido de humedad, se retoma el plan de aireación programado.

Módulos de aireación forzada

Este tipo de sistemas presenta diversas ventajas operativas. Si bien la inversión inicial es mayor, al requerir la adquisición de equipos generadores de flujo y redes de tuberías, los costos de operación tienden a ser bajos, ya que se limitan principalmente a la mano de obra para la conformación de pilas y al consumo energético asociado a la aireación. Esto puede significar una reducción en la carga laboral de los operarios.

No obstante, en la práctica se ha evidenciado que los procesos y fases del compostaje se ven retrasados por deficiencias en el flujo de aire causadas por el taponamiento de tuberías, lo que obliga a recurrir a volteos con maquinaria. Si bien esta actividad no representa un mal manejo, pues el volteo con maquinaria mejora la aireación y homogeneiza la temperatura en toda la biomasa, sí conlleva un aumento en los costos y tiempos de operación que no resultan eficientes frente al diseño inicial del sistema de aireación forzada. En este sentido, el uso de maquinaria resulta útil y hasta necesario, pero su aporte solo es plenamente efectivo cuando la aireación forzada cumple con su función.

Figura 11
Uso de maquinaria en sistemas deficientes de aireación forzada

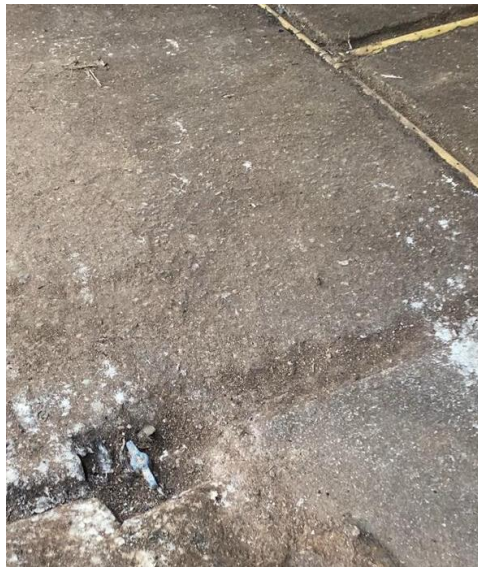


Entre las falencias más recurrentes se encuentra el diseño de sistemas compartidos de tuberías para aireación y evacuación de lixiviados. Aunque estas tuberías cuentan con válvulas de apertura y cierre para purga, el funcionamiento depende de la acción periódica de un operario. A

esto se suma que cerca de una tercera parte del material se pierde en forma de agua por lixiviación y volatilización de compuestos, lo que puede provocar acumulación excesiva de líquidos en el sistema al momento de encenderse. Esta situación afecta la eficiencia del compostaje y compromete también la seguridad y salud de los trabajadores, pues la ventilación no debería permitir acumulación de líquidos ni sustancias que interfieran con la oxigenación del material.

Figura 12

Sistema compartido de evacuación de lixiviados y aireación forzada



Otro factor que explica las deficiencias observadas es la acumulación de humedad y materiales finos como el aserrín que, al mezclarse, forman pastas que bloquean las tuberías semienterradas. Esto reduce el caudal de aire, genera zonas con baja oxigenación y retrasa el proceso de descomposición. Para enfrentar este problema se recomienda realizar limpiezas periódicas de las tuberías, instalar mallas de protección que reduzcan la entrada de finos y adicionar una base de material estructurante más grueso en el piso, que actúe como capa drenante. De igual forma, es frecuente disponer una capa inicial de aserrín seco, la cual facilita la recepción del material fresco y previene la saturación de la red.

Figura 13

Taponamiento de sistemas de aireación y purga de lixiviados



En cuanto al diseño, la mayoría de las plantas operan con sistemas de aireación positiva (de abajo hacia arriba), debido a que son más simples y económicos. Sin embargo, este tipo de aireación puede favorecer la entrada de lixiviados a las tuberías si no se conforma adecuadamente la pila. La aireación negativa (de arriba hacia abajo) ofrece ventajas en el control de olores y reduce la entrada de líquidos, pero implica mayores costos y mayor complejidad operativa. Para el contexto municipal, la aireación positiva resulta funcional siempre que se acompañe de buenas prácticas de conformación de pilas (altura moderada, material estructurante suficiente y mezcla homogénea), además de un plan riguroso de mantenimiento y limpieza de las tuberías.

En algunos casos se identificó que, al estar las tuberías elevadas aproximadamente 10 cm sobre el suelo y sostenidas por estructuras de cemento, se generaban acumulaciones de lixiviados en la base de las pilas, formando encharcamientos que afectaban la eficiencia de la aireación y creaban zonas saturadas que impedían el paso del aire.

Figura 14

Zona de encharcamiento por acumulación de lixiviados



Como respuesta a esta problemática, se implementaron alternativas como la separación de las tuberías destinadas a aireación respecto a las de conducción de lixiviados, lo que redujo significativamente la probabilidad de taponamientos. De forma complementaria, se realizaron perforaciones estratégicas en el suelo para facilitar el drenaje y conducir los lixiviados a través de tuberías independientes hacia tanques de almacenamiento, permitiendo un manejo más controlado y seguro de estos subproductos.

Figura 15

Optimización para el drenaje de lixiviados



Adicionalmente, se observó que en algunos sistemas se practicaron perforaciones en puntos específicos de los módulos de aireación forzada para mejorar la distribución del aire. Con esta medida se buscó favorecer el ingreso uniforme al interior de la pila, evitando zonas con baja oxigenación y promoviendo una mayor homogeneidad del proceso de compostaje.

Figura 16

Huecos en pilas de compostaje para mejorar la distribución de aire



Zona de maduración, tamizaje y molienda del material compostado

En diferentes plantas, la zona destinada a estas actividades suele encontrarse copada de material orgánico, ya sea por estancamiento en las etapas de molido, empaque o por la limitada capacidad de almacenamiento del producto final. Esta situación refleja que la capacidad operativa de la planta no siempre responde a las metas de aprovechamiento establecidas, generando cuellos de botella y afectando la continuidad del proceso.

La acumulación excesiva de material compromete además la movilidad interna, aumenta el riesgo de contaminación cruzada y afecta la calidad del compost cuando permanece almacenado por periodos prolongados sin rotación

Figura 17

Acumulación de subproducto en zona de maduración



A este problema estructural se suma la dificultad para distribuir el producto terminado, asociada a limitaciones en la búsqueda de accesos al mercado y al desconocimiento de la población sobre los usos y beneficios del compost. La combinación de factores internos y externos hace evidente la necesidad de ampliar o reorganizar áreas, al tiempo que se fortalecen estrategias de comercialización que impulsen una mayor rotación y aprovechamiento del material producido.

Uno de los aspectos que más inciden en el estancamiento de los procesos es la disposición y el orden de la planta. Un diseño adecuado no solo optimiza el transporte interno del material, sino que también permite un mejor control de variables externas como la humedad, el viento y las aguas superficiales, que pueden afectar la maduración del compost y generar olores indeseados. Disponer de un flujo continuo y lógico resulta clave: evita retrocesos del material hacia zonas ya utilizadas, reduce riesgos de contaminación cruzada entre residuos frescos y material estabilizado, y minimiza tiempos y costos adicionales.

Figura 18

Planta con capacidad limitada por espacio y secuencia de procesos



En una de las plantas observadas, con un área aproximada de 700 m², solo se utiliza en promedio dos terceras partes de la superficie. Allí se ubican seis módulos de aireación forzada, cada uno con capacidad para recibir cerca de 30 toneladas de residuos orgánicos mensuales. Sin embargo, estos módulos se encuentran contiguos a las pilas de maduración y a la zona de empaque, lo que genera interferencias operativas: el material ingresa a los módulos, pero debe trasladarse a un área de maduración situada apenas tres metros al frente, y posteriormente retornar hacia la zona de empaque. Esta disposición interrumpe la secuencia natural del proceso e impide aplicar de forma adecuada el principio FIFO (First In–First Out), generando acumulaciones e ineficiencias.

Figura 19

Planta de compostaje con interferencias de flujo



El área restante, actualmente destinada a módulos de aireación pasiva y subutilizada, representa una oportunidad de mejora. Si este espacio se destinara a maduración, se podría configurar un flujo más eficiente: (1) recepción y mezcla inicial, (2) compostaje en módulos de aireación forzada, (3) traslado a un área de maduración independiente, y (4) avance final hacia trituración, empaque y almacenamiento. De esta forma cada etapa tendría su espacio definido, se reducirían interferencias y se consolidaría un recorrido en secuencia que aplique la lógica FIFO, disminuyendo acumulaciones y mejorando la eficiencia operativa.

Figura 20
Zona subutilizada con módulos de aireación convectiva



Nota. Fuente Informes Técnicos de Cornare

Para optimizar la maduración y el secado del producto, algunas plantas han implementado soluciones prácticas como el uso de tejas traslúcidas que permiten la entrada de luz solar, favoreciendo la reducción de humedad. También se emplean cubiertas plásticas o mallas permeables que protegen de la lluvia sin impedir la ventilación, junto con la incorporación de material estructurante seco en la mezcla y volteos periódicos. Estas medidas facilitan la pérdida de humedad y permiten obtener un compost de mejor calidad en menor tiempo.

Figura 21

Tejas traslucidas para favorecer el proceso de maduración

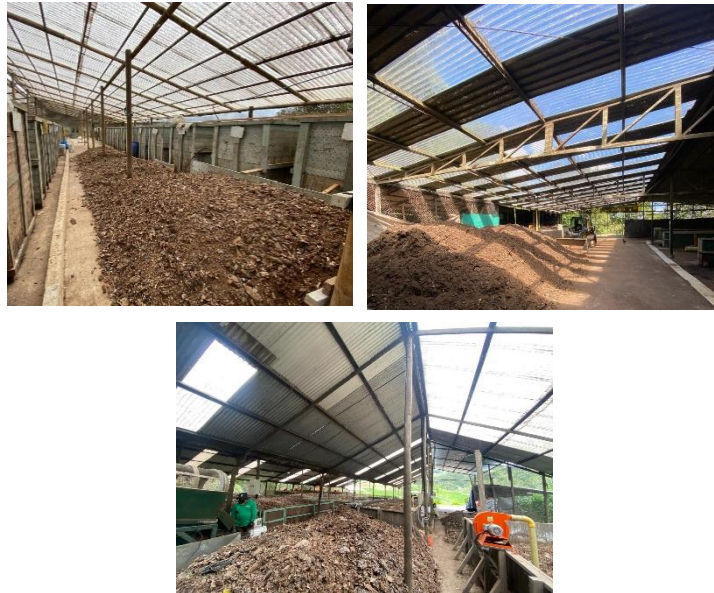


Figura 22

Influencia de entrada de luz por tipo de cubierta



No obstante, también se ha evidenciado que la presencia de pequeños orificios en las cubiertas puede generar el efecto contrario. Filtraciones puntuales de agua de lluvia, como las que se producen por goteras sobre las pilas en proceso de maduración, aportan humedad localizada que interrumpe la uniformidad del secado y retrasa la estabilización del compost. Estos aportes irregulares de agua crean zonas con exceso de humedad, lo que alarga innecesariamente los tiempos de maduración y puede favorecer la aparición de olores o lixiviados.

Figura 23

Efecto de gotera sobre pila del compost



Durante la fase de maduración y en el paso por los módulos, el material alcanza una relativa estabilización de temperatura y humedad. Sin embargo, suelen persistir partículas gruesas o fracciones no orgánicas que no se transforman en las fases iniciales y ocupan espacio sin aportar al proceso biológico. Al someter el material al tamizaje y molienda, estas fracciones se descartan y el producto adquiere mayor homogeneidad, constituido casi en su totalidad por partículas finas de origen orgánico.

La reducción del tamaño de partícula en el proceso de tamizaje, posterior a maduración, incrementa la superficie de contacto para los microorganismos, lo que puede reactivar procesos de degradación en compuestos que aún no habían sido transformados por completo. Este fenómeno se refleja en un ligero aumento de temperatura, señal de que persiste actividad microbiana residual. No obstante, lejos de ser un problema, corresponde a una fase natural del compostaje. Por ello, se recomienda mantener el material molido y tamizado en almacenamiento por un periodo adicional, de manera que culmine su estabilización antes del empaque y la distribución. Esta práctica asegura un compost más estable, seguro y de mayor calidad, reduciendo el riesgo de variaciones posteriores en campo.

Aspectos complementarios

En términos generales, la mayoría de las plantas de compostaje de la jurisdicción presentan un manejo estructural adecuado, con cerramientos, cubiertas, pisos impermeables y sistemas de conducción de lixiviados que cumplen su función de prevenir o reducir la proliferación de insectos y vectores. Estos elementos son esenciales, ya que protegen la calidad del compost y evitan condiciones indeseadas dentro de las instalaciones.

No obstante, también se han identificado problemáticas recurrentes, entre ellas la humedad excesiva por ausencia de material seco estructurante en la mezcla, el incremento de temperaturas fuera de rango y la presencia de residuos frescos expuestos. Estas condiciones favorecen la proliferación de roedores, moscas y otros insectos, lo cual no solo representa un riesgo de salubridad, sino que además afecta directamente el proceso de compostaje al generar zonas anaerobias donde se producen metano y compuestos responsables de olores ofensivos. El compactamiento del material orgánico, combinado con mezclas deficientes en relación C/N y la falta de estructurante seco, refuerza estas condiciones desfavorables.

Figura 24

Módulos con alto contenido de humedad por falta de material seco estructurante



Como medidas preventivas, algunas plantas han implementado mallas de sombra para limitar el ingreso de insectos voladores, o adicionan material estructurante seco (aserrín, viruta,

compost maduro) como capa de cobertura sobre las pilas. Esta práctica ayuda a controlar la humedad superficial y reduce la ovoposición de moscas. También se recomienda cubrir inmediatamente los residuos frescos, ya sea con lonas o con material seco, evitando que permanezcan expuestos y disminuyendo la atracción de vectores.

Figura 25

Ingreso de vectores y aves por falta de cerramiento perimetral



En ciertos casos se han observado prácticas como la aplicación de cal, hipoclorito o desinfectantes de uso veterinario. Es necesario aclarar que el uso de cal directamente sobre las pilas no es recomendable, ya que modifica el pH del material y altera la microbiología propia del compostaje. El hipoclorito y los desinfectantes veterinarios, en cambio, pueden emplearse únicamente en la limpieza de pisos, zonas comunes y canales de lixiviados, pero nunca sobre el compost en proceso, dado que afectarían la microbiota encargada de la degradación.

Otra práctica observada consiste en la colocación de cestas con carbón activado en columnas laterales, con el propósito de adsorber compuestos odoríferos y disminuir la atracción de moscas. Si bien esta medida puede aportar un efecto puntual, su utilidad en sistemas abiertos es limitada, por lo que debe considerarse únicamente como un complemento a las prácticas de manejo.

En síntesis, la estrategia más efectiva para el control de vectores en compostaje continúa siendo la gestión adecuada del proceso: mantener la humedad en rangos óptimos (50–60 %), realizar volteos regulares, garantizar una relación C/N equilibrada, emplear suficiente material estructurante y cubrir oportunamente los residuos frescos. Las demás medidas, como el uso de carbón activado o desinfectantes en áreas externas, pueden apoyar el manejo, pero no sustituyen las prácticas operativas básicas que aseguran la estabilidad y la calidad del compost.

5.2 Evaluación económica

La evaluación económica se fundamenta en los lineamientos del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2000), el cual establece que los proyectos de aprovechamiento y valorización de residuos deben evaluarse considerando su factibilidad económica, técnica y ambiental. En este marco, se contempla el análisis de costos de capital, costos de operación y venta de subproductos como componentes esenciales para determinar la viabilidad de este tipo de iniciativas.

Sin embargo, en el presente trabajo el análisis no incluye el componente de costos de capital, en concordancia con el alcance definido para las prácticas profesionales. Dado que la planta de compostaje de Marinilla cuenta con infraestructura y equipos previamente entregados por Cornare mediante convenios interadministrativos, no se cuenta con estimaciones precisas sobre la inversión inicial. Por esta razón, la evaluación se centra en los costos de operación (con énfasis en la mano de obra necesaria para la operación de un módulo de compostaje) y en la venta de subproductos, tomando como referencia el compost producido y su precio de comercialización en el mercado local.

La información utilizada para este análisis se obtuvo a partir de diálogos con el encargado de la planta de aprovechamiento de residuos orgánicos del municipio de Marinilla, así como de la documentación técnica disponible sobre sus procesos. La planta ocupa un área aproximada de 750 m², en la cual se encuentran 13 módulos de compostaje de aireación forzada: 11 destinados al proceso activo, uno para favorecer la maduración y secado, y otro vacío que se utiliza como respaldo para la recepción de nuevas descargas. Cada módulo cuenta con una capacidad de 40 a 45

toneladas, de las cuales se aprovecha alrededor del 35 %, mientras que el restante 65 % corresponde a pérdidas asociadas por humedad, lixiviación y rechazo de material dispuesto.

5.2.1 Composición de los residuos

La fase inicial de los procesos productivos de la planta de compostaje se encuentra directamente relacionada con la separación en la fuente y la posterior recolección diferenciada de los residuos orgánicos. El vehículo recolector asignado a esta labor desarrolla sus actividades los días martes y viernes, realizando la recolección en la cabecera municipal y transportando el material hasta la planta de tratamiento, ubicada aproximadamente a 18 km del casco urbano, en un predio contiguo al relleno sanitario.

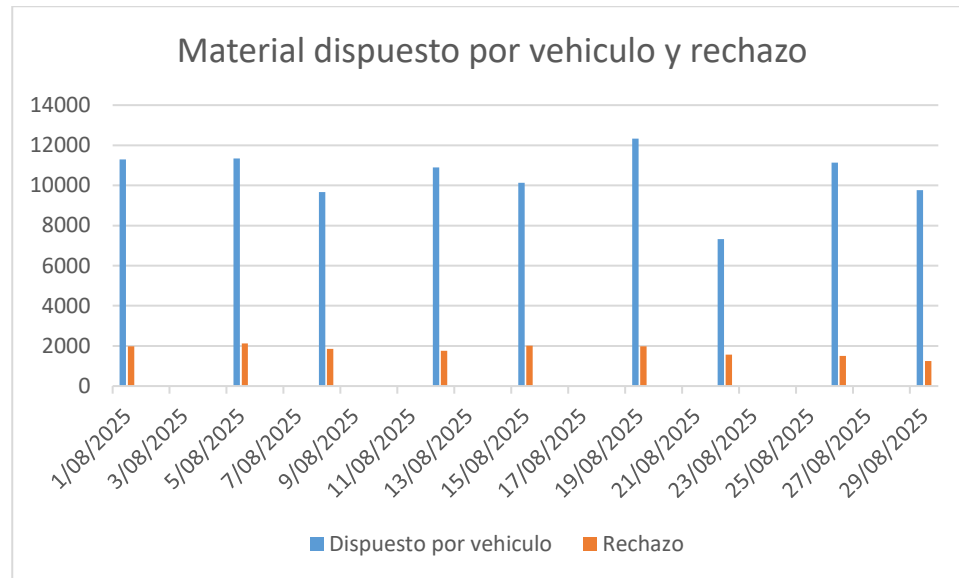
Una vez recibidos los residuos en la planta, se procede a su clasificación y control, con el fin de separar los materiales orgánicos aprovechables de aquellos elementos que no son aptos para el proceso de compostaje. Durante el mes de agosto del presente año, la planta recibió un total estimado de 93,87 toneladas de residuos orgánicos, de los cuales se obtuvo un rechazo de 16,01 toneladas, equivalente al 17,05 % del material ingresado.

Tabla 1
Reportes de ingreso de material orgánico a planta de compostaje

FECHA	DÍA	HORA	VEHICULO	VOL M3	PESO ENTRADA (Kg)	PESO SALIDA (Kg)	DISPUESTO POR VEHICULO (Kg)	RECHAZO (Kg)	CANTIDAD PARA MÓDULO
1/08/2025	Vie	1:00 am	Recolector	13	22420	11120	11300	1980	9320
5/08/2025	Mar	2:00 am	Recolector	13	22740	11390	11350	2120	9230
8/08/2025	Vie	2:14 am	Recolector	13	21020	11360	9660	1850	7871
12/08/2025	Mar	12:35 am	Recolector	13	22180	11290	10890	1760	9130
15/08/2025	Vie	12:40 am	Recolector	13	21320	11190	10130	2010	8120
19/08/2025	Mar	1:26 am	Recolector	13	23730	11400	12330	1980	10350
22/08/2025	Vie	2:22 am	Recolector	13	18830	11510	7320	1560	5760
26/08/2025	Mar	1:56 am	Recolector	13	22360	11230	11130	1500	9630
29/08/2025	Vie	1:45 am	Recolector	13	20960	11200	9760	1250	8510

Nota. Fuente Informe de prestación de servicios profesionales de agronomía para optimización del proceso de aprovechamiento de material orgánico de Marinilla.

Figura 26
Composición de residuos dispuestos en planta de compostaje



Los residuos no aprovechables identificados incluyen principalmente plásticos, restos cárnicos, latas metálicas, vidrios, estiércol animal, pañales desechables y otros elementos no biodegradables, que además de no ser aptos para el compostaje, representan un riesgo potencial para la seguridad e integridad del personal encargado de la operación.

Figura 27
Residuos no orgánicos encontrados en la jornada de recepción de residuos orgánicos



Nota. Fuente Informe de prestación de servicios profesionales de agronomía para optimización del proceso de aprovechamiento de material orgánico de Marinilla.

5.2.2 Costos de operación

En relación con los costos de operación, se tomó como referencia el salario mínimo legal mensual vigente para el año 2025, equivalente a \$1.623.500, el cual, al ser convertido en valor hora-hombre, permitió calcular el costo de la mano de obra necesaria en cada una de las actividades que se desarrollan a lo largo del proceso de compostaje. De esta forma, se logró establecer el requerimiento en horas para cada etapa productiva y su correspondiente valor económico, considerando tanto los tiempos de trabajo como el número de operarios asignados a cada labor.

Tabla 2
Costos operativos tomados para el año 2025

Costo operativo	Mes	Días
Salario operario barrido	\$ 1.623.500,00	30
Valor día	\$ 54.116,67	
Valor hora	\$ 6.764,58	
Valor minuto	\$ 112,74	

Se debe tener en cuenta que el llenado de un módulo de compostaje se completa generalmente con cuatro descargas del vehículo recolector. Para efectos de este análisis, se adopta como referencia una capacidad de tratamiento del módulo de 40 toneladas, valor que corresponde al promedio operativo registrado en la planta.

Tabla 3
Parámetros de entrada para la evaluación económica de la planta de compostaje del municipio de Marinilla

Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Capacidad por modulo (Ton)	40000	Kg
% de aprovechamiento	0,35	%
Compost resultante aproximado	14000	Kg
Peso bulto (Kg)	40	kg
Producción estimada	350	Bultos/modulo

La fase de recepción y almacenamiento integra, dentro de una misma jornada operativa, tres actividades encadenadas: (1) recepción y descarga del vehículo recolector, (2) clasificación/desembolso del material, y (3) traslado y llenado de los módulos. De acuerdo con la

organización de la planta, estas jornadas se realizan los lunes y viernes con un equipo de 5 operarios. Con base en la información de planta, cada descarga (recepción) se maneja como una jornada de 8 horas, cuyo desglose típico es de 40 - 60 minutos para descarga y control de ingreso, 6 horas para desembolse y clasificación y entre 1-2 horas para llenado de módulo dependiendo de la cantidad aprovechable resultante. Este desglose fue corroborado en reunión con el encargado y coincide con el enfoque de “promedio de actividades por hora” reportado a partir de tiempos medidos a cada operario de la planta.

Para completar el llenado de un módulo se requieren, en condiciones normales, cuatro descargas del recolector (4 recepciones). En situaciones de mayor rechazo o menor volumen recolectado, puede requerirse una quinta descarga; en este estudio se adopta el escenario base de cuatro descargas, coherente con la capacidad de tratamiento del módulo. Siendo así, las HH se toman de la siguiente manera por cada actividad.

$$HH = (\# \text{ de recepciones}) \times (\text{horas por recepción}) \times (\# \text{ de operarios})$$

Tabla 4

Costos de recepción, almacenamiento, selección y desembolse de material orgánico

RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL MATERIAL ORGÁNICO, SELECCIÓN Y DESEMBOLSE + LLENADO DE MÓDULOS		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Numero operarios	5	
Numero Horas por recepción - ingreso a módulo	8	Horas
HH (4 recepciones)	160	Horas
Costo horas totales por recepción - ingreso a módulo	54116,67	Horas
Costo operativo por recepción - ingreso a módulo	270583,33	Pesos/vehículo
Costo operativo x llenado de modulo (4 recepciones)	\$ 1.082.333,33	Pesos/modulo

El monitoreo de los módulos de compostaje corresponde a la labor de seguimiento de variables de control, principalmente temperatura y pH, actividad fundamental para garantizar que el proceso biológico se desarrolle en condiciones óptimas y evitar desviaciones que comprometan la calidad del producto.

De acuerdo con la información obtenida en planta, esta actividad se realiza con una frecuencia de tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) y tiene una duración promedio de 40 minutos por jornada para supervisar de manera conjunta los 12 módulos activos de la planta.

Tabla 5
Costos de monitoreo de módulos

MONITOREO DE MODULOS		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Número de operarios	1	
Tiempo semanal total de monitoreo (12 módulos)	2	Horas/semana
Tiempo por ciclo de 12 semanas de permanencia en modulo	24	Horas/ciclo
Tiempo por modulo (HH)	2	Horas/modulo
Costo por modulo	\$ 13.529,17	Horas/modulo

La fase de vaciado y limpieza de modulo (retirar remanentes, lavar tuberías de aireación y dejar listo para el siguiente ciclo), ocurre una vez el material ha permanecido en el módulo e involucra su transporte a una zona de maduración y afinamiento de parámetros como temperatura y humedad.

Para el escenario base se adopta un módulo de 40 toneladas de ingreso; con un aprovechamiento del 35 %, el material aprovechable a evacuar es del orden de 14 toneladas (previo a su acondicionamiento en triturado y cernido), el resto (materia no conforme y pérdidas) ya fue descartado y otra parte se descarta posteriormente en cernido a partir de la separación del material grueso, inorgánicos y orgánicos de consistencia dura.

Con base en los registros y en el análisis de actividades por hora, la vaciada de un módulo requiere aproximadamente 8 horas contando su transporte al módulo de maduración y afinamiento, y el aseo del módulo (incluido lavado de tubería) 2 horas. Estas labores las ejecuta un equipo de 2 operarios.

Tabla 6

Costos de vaciado y aseo de módulos de aireación forzada

VACIADO + ASEO DE MÓDULO		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Numero operarios	2	
Numero Horas	10	Horas
HH	20	Horas
Costo horas totales	\$ 135.291,67	Pesos/modulo

Posterior a la fase de maduración y afinamiento, el material se tritura y se hace cernido en trómel para homogeneizar el tamaño de partícula y retirar fracciones no conformes (trozos grandes, impropios residuales). Esta etapa define en gran medida la presentación comercial del abono.

Para la fase de triturado y cernido se adopta un tiempo base de 4 días de operación con 2 operarios a jornada de 8 h/día, en línea con la práctica de planta. Este bloque procesa la totalidad del material estabilizado del módulo, por lo que se trata como esfuerzo por módulo. Dado que el rendimiento puede variar por humedad del material, granulometría de entrada y disponibilidad/mantenimiento del trómel.

Tabla 7

Costos de triturado y cernido de material

TRITURADO + CERNIDO		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Numero operarios	2	
Numero Horas	32	Horas
Costo operativo	\$ 432.933,33	Horas/modulo

Para el empacado del compost resultante, con base en cronometrajes de planta, el tiempo unitario es de 108 segundos para el llenado y 12 segundos para el cerrado del bulto; se adopta 2 min/bulto como valor redondeado y conservador. La producción útil por módulo (tras cernido) es aproximadamente 300 bultos. La tarea la ejecutan usualmente 2 operarios en paralelo.

Tabla 8

Costos de empaque y amarre por bulto

EMPAQUE Y AMARRRE (por bulto)		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Numero operarios	2	
Numero minutos x bulto	2	min
Producción útil del modulo	300	bultos de 40 Kg
Horas por operario (HH)	10	HH
Costo empaque modulo	\$ 67.645,83	Pesos/modulo

El Traslado de bultos desde área de empaque a bodega, organización y registro básico tiene un promedio cronometrado de 2,6 min/bulto (rango observado 2,4–2,9 min), ejecutado por 2 operarios. Se mantiene 300 bultos/módulo.

Tabla 9

Costos de almacenamiento del abono por bulto

ALMACENAMIENTO DEL ABONO (por bulto)		
Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Numero operarios	2	
Numero minutos x bulto	2,6	min
Horas de almacenamiento por operario (HH)	13	Horas
Ajuste de tiempo por número de operarios	6,5	min/operario
Costo de transporte total de bultos	\$ 87.939,58	Pesos/cantidad producida

Tabla 10

Costos de producción por mano de obra para un módulo de aireación forzada

COSTO DE PRODUCCIÓN POR MANO DE OBRA PARA UN MODULO		
Costo de operación por modulo	\$ 1.819.672,92	Pesos/modulo
Costo por bulto	\$ 6.065,58	Pesos/bulto

Dentro de los insumos directos considerados en el análisis económico, el costal de polipropileno constituye un elemento fundamental, pues asegura la presentación final del compost y facilita su comercialización en el mercado local. Según la cotización suministrada por la empresa Sacos KENT, para el envasado de bultos de 40 kg de abono se recomienda un costal de 60×90 cm, cuyo precio unitario con IVA es de \$1.120 en su versión impresa y de \$951 en su versión sin impresión.

La producción útil de un módulo, después del proceso de cernido, se aproxima a 300 bultos, por lo que el costo total de costales por ciclo alcanza los \$336.000 en el escenario con impresión y los \$285.300 en el escenario sin impresión. Esto equivale a un valor unitario de \$1.120 por bulto en el primer caso y \$951 por bulto en el segundo.

Tabla 11

Costos de mano de obra y costales como insumo

Escenario	Costo mano de obra	Costal bulto por	Total por bulto	Total por modulo
Con impresión	\$ 6.065,58	\$ 1.120,00	\$ 7.186,00	\$ 2.155.800,00
Sin impresión	\$ 6.065,58	\$ 951,00	\$ 7.017,00	\$ 2.105.100,00

Al integrar este insumo con el costo de mano de obra directa, que asciende a \$6.066 por bulto (equivalente a \$1.819.800 por módulo), el costo parcial de producción se ubica en un rango de \$7.017 a \$7.186 por bulto, dependiendo de la alternativa seleccionada. Esta cifra refleja el peso económico que tienen los costales dentro del proceso de compostaje, pues su inclusión incrementa el costo unitario en cerca de un 15–18 % respecto al valor de la mano de obra.

5.2.3 Venta de subproductos

El principal subproducto generado en la planta de compostaje de Marinilla es el compost en bultos de 40 kg, cuyo precio de comercialización local se encuentra en torno a los \$12.000 por unidad. Este valor fue confirmado en conversaciones con el encargado de la planta y se toma como referencia para el análisis económico.

Considerando que cada módulo de compostaje procesa en promedio 40 toneladas de material orgánico y que, después del cernido, el aprovechamiento efectivo corresponde al 35 %, la producción útil se aproxima a 300 bultos de 40 kg por módulo. Bajo estas condiciones, los ingresos brutos por módulo ascienden a:

$$300 \text{ bultos} \times \$12.000/\text{bulto} = \$3.600.000$$

Cuando se contrastan estos ingresos con los costos de operación, se observa que el costo de mano de obra directa representa \$1.819.672 por módulo, equivalentes a \$6.066 por bulto. Al adicionar el insumo de costales, el costo total se ubica entre \$7.017 y \$7.186 por bulto, dependiendo de si se emplea costal sin impresión o impreso. Esto equivale a un costo por módulo entre \$2.105.100 y \$2.155.800.

De esta manera, el margen operativo bruto por módulo se sitúa en el rango de \$1.494.900 a \$1.444.200, según la opción de costal seleccionada. En términos relativos, este margen representa una utilidad bruta cercana al 40 % respecto a los ingresos generados por la venta del compost.

Este resultado evidencia que, aun cuando el costo de los costales incrementa de forma significativa el valor de producción respecto al costo de mano de obra, la operación continúa siendo rentable frente al precio de venta vigente. No obstante, es importante resaltar que este análisis aún no incorpora otros insumos y servicios (amarras, etiquetas, aserrín, consumo energético y mantenimiento), por lo que los márgenes reales pueden ser menores. Aun así, el panorama general muestra que la planta de compostaje cuenta con un modelo económico sostenible, siempre que se mantenga la producción útil cercana a los valores estimados y que el precio de venta del compost no se reduzca por debajo del rango actual.

No obstante, el escenario de venta de compost en plantas municipales y regionales presenta limitaciones importantes. Una de las principales corresponde a la ausencia de certificación del ICA en gran parte de estas iniciativas, lo cual repercute directamente en una reducción del precio de mercado, ya que sin un aval técnico oficial no se establecen parámetros de calidad que transmitan confianza plena al consumidor. Esta condición genera una brecha frente a otros productos similares que sí cuentan con certificación y, en consecuencia, logran un mejor posicionamiento comercial.

De manera complementaria, el compost producido en estas plantas suele ser aún poco reconocido en los mercados locales y regionales, lo que obliga a fortalecer las estrategias de publicidad y mercadeo con el fin de ampliar su visibilidad y aceptación entre agricultores, viveros y demás compradores potenciales. Asimismo, resulta necesario impulsar una búsqueda activa de nuevos mercados, no solo a nivel local, sino también regional y en esquemas de comercialización

compartida entre municipios, de modo que se garantice una colocación estable y se aprovechen economías de escala en la distribución del producto.

En términos generales, aunque los resultados económicos muestran que la operación de las plantas de compostaje puede alcanzar márgenes positivos, la sostenibilidad de la venta de subproductos no depende exclusivamente de la relación costo–beneficio. Esta también está condicionada por el fortalecimiento de la confianza del consumidor, la implementación de procesos de certificación oficial y el desarrollo de estrategias comerciales sólidas, que permitan consolidar el compost como un producto competitivo y confiable dentro del mercado de abonos orgánicos en Colombia.

5.2.4 Revisión normativa y de mercado para el fortalecimiento empresarial

En el marco del aprovechamiento, además pueden obtenerse diversos incentivos que pueden ser del orden dinerario o no, y para ello, debe expresarse que una sentida parte de las empresas poseen cargas tributarias impositivas que pueden aliviarse con inversiones relacionadas al medio ambiente.

Incentivos tributarios ambientales

Muestra de lo anterior, se aprecia en la Ley 1819 de 2016, “Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones.”, en razón a que en el artículo 255 se describe que “Las personas jurídicas que realicen directamente inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente, tendrán derecho a descontar de su impuesto sobre la renta a cargo el 25% de las inversiones que hayan realizado en el respectivo año gravable” no obstante, no tiene derecho a descuento las inversiones ordenadas por una autoridad ambiental para mitigar el impacto ambiental producido por una obra o actividad, o en su defecto, el cumplimiento mínimo en las metas de aprovechamiento del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

Este incentivo aplica como un descuento tributario, mas no es una deducción. Siendo así, la búsqueda de estos descuentos para inversiones realizadas en control puede reducir directamente el valor a pagar del impuesto sobre la renta cuando los proyectos ejecutados se realizan de forma directa, impulsando el desarrollo y control ambiental sin medidas impuestas, es decir, que no estén condicionados a un proceso obligatorio y se realice de forma voluntaria. Este incentivo es utilizable como estrategia de recuperación de la inversión vía impuestos. Mas adelante veremos que la empresa debe demostrar que la planta, maquinaria o infraestructura fue adquirida o mejorada por ellos.

Es importante resaltar que estos descuentos tributarios tienen unas limitaciones establecidas en el Artículo 258 de la misma Ley, que consiste en que los descuentos no podrán exceder del 25% del impuesto sobre la renta a cargo del contribuyente en el respectivo año gravable y, en su lugar, podrá tomarse dentro de los cuatro (4) períodos gravables siguientes a aquel en que se efectuó la inversión en control y mejoramiento del medio ambiente.

Así mismo, el Decreto 1625 de 2016 y el Decreto 2205 de 2017 tienen implicaciones sobre los beneficios tributarios ambientales, donde se puede inferir que el aprovechamiento de residuos orgánicos una forma valida de inversión ambiental. En este marco, se definen como tales aquellas *“orientadas a resultados medibles y verificables de disminución de la demanda de recursos naturales, o de prevención y/o reducción en la generación de residuos líquidos, emisiones atmosféricas o residuos sólidos”* (Decreto 1625 de 2016, art. 1.2.1.18.51).

Entre los requisitos principales se encuentra que *“la inversión sea realizada por persona jurídica, de forma directa, en el mismo año gravable, y cuente con certificación de la autoridad ambiental en la que conste que no fue ordenada por mandato de licencia ambiental”* (art. 1.2.1.18.52). De este modo, el beneficio del 25 % solo aplica para inversiones ejecutadas y contabilizadas dentro del año fiscal correspondiente. En general, esta herramienta refuerza la sostenibilidad financiera de los sistemas de compostaje municipales, al permitir que las Empresas de Servicios Públicos (ESP) recuperen parcialmente sus inversiones mediante un instrumento tributario.

El Decreto 2205 de 2017 complementa que las autoridades ambientales pueden certificar previamente la pertinencia de la inversión y realizar seguimiento anual a los proyectos. En caso de incumplimiento, el contribuyente debe reintegrar el valor del descuento solicitado, junto con intereses y sanciones correspondientes.

Las inversiones que dan derecho al descuento comprenden rubros como la construcción de obras biomecánicas o mecánicas, adquisición de equipos para monitoreo ambiental, compra de predios destinados a la conservación de fuentes de agua, proyectos enmarcados en los PGIRS, o en planes de saneamiento y manejo de vertimientos. En contraste, no otorgan derecho al descuento aquellas inversiones efectuadas por mandato de una autoridad ambiental, las de mantenimiento industrial rutinario, las enfocadas en eficiencia energética sin concertación con el Ministerio de Ambiente, o estudios de preinversión, entre otras.

Es fundamental identificar qué tipos de inversiones no califican para el descuento del 25 %. Particularmente, se excluyen aquellas que no puedan ser clasificadas explícitamente como actividades de control ambiental bajo los artículos 1.2.1.18.51 al 1.2.1.18.56, así como inversiones en mantenimiento industrial, eficiencia energética o reconversión industrial que no acrediten impacto ambiental directo. Esta diferenciación es clave para que las Empresas de Servicios Públicos (ESP) que operan sistemas de compostaje municipal puedan estructurar adecuadamente sus inversiones y respaldarlas con soporte técnico y normativo ante la autoridad ambiental y la DIAN.

Como es evidente, existen beneficios de variados asuntos sobre el medio ambiente, y el aprovechamiento no escapa de ello. Sin embargo, también existen otros reconocimientos, como las certificaciones que emite ICONTEC en neutralidad de carbono, la gestión de Basura Cero o la ISO 14001, esta última relacionada con la sostenibilidad ambiental desde la alta dirección de los municipios. Tales reconocimientos representan ventajas que pueden articularse con normas de contratación pública e incentivos financieros.

De igual forma, la Resolución No. 1555 de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial emitió el Sello Ambiental Colombiano, que identifica los productos con criterios de sostenibilidad. También la Autoridad Nacional Designada del Mecanismo de

Desarrollo Limpio (MDL) acredita y/o emite Certificados de Reducción de Emisiones (CER). En el caso de municipios que actúan como prestadores directos de servicios públicos domiciliarios, la Superintendencia de Servicios Públicos expide certificaciones que acreditan el cumplimiento del Decreto 1077 de 2015 y sus normas complementarias.

Finalmente, existen otros reconocimientos emitidos por el Gobierno Nacional e instancias internacionales en materia de gestión cultural, certificaciones de Basura Cero, innovación en la gestión pública o premios a planes de desarrollo territorial, los cuales pueden ser aprovechados por los municipios para fortalecer su posicionamiento institucional y ambiental.

En el ámbito del aprovechamiento de residuos, la estrategia Basura Cero se consolida como *“una iniciativa mundial que surge a partir de la problemática ambiental generada por el aumento descontrolado de residuos que se depositan diariamente en los rellenos sanitarios”* (ICONTEC y Basura Cero Colombia, Certificación CSBC). Esta apuesta ha encontrado en América Latina un terreno fértil para la estandarización de sistemas de gestión integral de residuos y la consolidación de modelos más sostenibles.

Incentivos por aprovechamiento y tratamiento (IAT)

El Artículo 88 de la Ley 1753 DE 2015 (Plan Nacional de Desarrollo) da inicio legal del actual esquema de incentivos por aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos en Colombia reformando el artículo 251 de la Ley 1450 de 2011, para incorporar un enfoque sostenible orientado a la gestión integral de los residuos mediante el tránsito hacia modelos que reconocen el valor económico, social y ambiental de los residuos a través del aprovechamiento.

Este artículo dispone lo siguiente:

“Créase un incentivo al aprovechamiento de residuos sólidos en aquellas entidades territoriales en cuyo Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) se hayan definido proyectos de aprovechamiento viables.” (Congreso de Colombia, 2015)

En este caso, se muestra un claro reconocimiento a aquellos municipios que se comprometen con aquellas estrategias de gestión de residuos de manera que se fomente la economía circular.

Este artículo establece que:

“El valor por suscriptor de dicho incentivo, se calculará sobre las toneladas de residuos no aprovechables por suscriptor del servicio público de aseo, como un valor adicional al costo de disposición final de estos residuos. El Gobierno Nacional reglamentará la materia y su implementación podrá ser de forma gradual.”

De esta manera, se puede decir que el costo es trasladado parcialmente al usuario final del servicio público de aseo y, el valor adicional en su factura debe promover las actividades de aprovechamiento y reducción progresiva sobre la presión en los sistemas de disposición final, además de promover la participación activa y responsabilidad compartida entre usuarios, prestadores y el Estado.

Este artículo también establece que los recursos recaudados deben ser destinados a aquellas actividades de aprovechamiento del servicio público de aseo para el desarrollo de infraestructura, recolección, transporte y otras formas de aprovechamiento. Adicionalmente, pueden emplearse en:

“la elaboración de estudios de pre-factibilidad y factibilidad que permitan la implementación de formas alternativas de aprovechamiento de residuos, tales como el compostaje, el aprovechamiento energético y las plantas de tratamiento integral de residuos sólidos, entre otros.”

De esta manera se confirma que el compostaje, objeto de estudio, se reconoce como una estrategia válida para acceder a esos recursos, siempre y cuando el proyecto se encuentre contemplado en el PGIRS y se haya definido como viables proyectos asociados a la actividad de aprovechamiento y/o tratamiento y se conserva incluso en aquellos municipios donde se ubiquen rellenos sanitarios de carácter regional donde se dispone que:

EVALUACIÓN ECONÓMICA, TÉCNICA Y AMBIENTAL EN SISTEMAS DE COMPOSTAJE MUNICIPALES...

“El valor de dicho incentivo continuará siendo pagado por el prestador al municipio donde se ubique el relleno sanitario de la actividad de disposición final y su tarifa será entre 0,23% y 0,69% del salario mínimo mensual legal vigente (smmlv) por tonelada dispuesta.”

Se expresa también que dicho pago proveniente de los incentivos solo debe usarse para actividades relacionadas con agua potable y saneamiento y que los mecanismos regulatorios mencionados y esenciales para la implementación de esta ley están a cargo de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), la cual establece el mecanismo de inclusión del incentivo en la tarifa del usuario final, salvo aquellos municipios que tienen su propio sitio de disposición. El Decreto 802 de 2022 incluye y define aspectos de aplicación sobre el funcionamiento del IAT, incluyendo su facturación, recaudo, asignación de recursos y parámetros acerca de la presentación y evaluación de los proyectos.

De acuerdo al artículo 2.3.2.7.3. el valor de este incentivo se establece como un porcentaje equivalente al 0,80% de un salario mínimo mensual vigente (SMMLV) por cada tonelada de residuos orgánicos no aprovechados dispuesto en relleno sanitario por suscriptor del servicio público de aseo sanitario ($VIAT (\$/Ton) = SMMLV * 0,80\%$), siendo implementado este cobro en aquellos municipios que tengan proyectos de aprovechamiento viables en su PGIRS con el fin de fomentar la separación en la fuente y reducir los residuos dispuestos en el relleno. Además, se tienen otras disposiciones sobre el uso exclusivo de una cuenta para lo relacionado con el manejo financiero del IAT. Para los proyectos del programa Mejoragro, el Decreto 802 ofrece un respaldo jurídico delimitando el marco y los componentes dentro de los cuales se puede estructurar y encontrar viabilidad para el acceso al incentivo, en la medida que se dé cumplimiento a las disposiciones señaladas

El IAT representado en la Resolución 547 de 2022 sugiere un ingreso adicional para aquellos prestadores o municipios a los que se le haya verificado el cumplimiento de condiciones técnicas, financieras y administrativas que aseguren una correcta operación y trazabilidad de la actividad de aprovechamiento, donde dentro de esto tienen relevancia las siguientes disposiciones:

(Art. 1, Resolución 0547 de 2022)

Artículo 1. Requisitos para presentar proyectos de Aprovechamiento y Tratamiento para acceder a los recursos del Incentivo. Las personas prestadoras de las actividades principales y complementarias del servicio público de aseo, interesadas en acceder a los recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos deberán cumplir con la totalidad de los requisitos señalados en el Anexo Técnico de la presente Resolución, el cual hace parte integral de la misma. La falta de cumplimiento de dichos requisitos dará lugar a la devolución del proyecto.

(Art. 2, Resolución 0547 de 2022)

Tipos de proyectos financiables con el IAT

Artículo 2. Proyectos de Aprovechamiento susceptibles de ser financiados con recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de residuos sólidos (IAT). Podrán financiarse con los recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos (IAT) los siguientes proyectos:

- 1. Proyectos que permitan mejoras logísticas y operacionales para lograr eficiencia económica en la prestación de la actividad de aprovechamiento en el marco del Decreto 1077 del 26 de mayo de 2015, modificado y adicionado por el Decreto 596 de 2016 o aquel que lo modifique o sustituya, previo a la reincorporación al ciclo económico, en el marco de la economía circular.*
- 2. Proyectos para el desarrollo de infraestructura asociada con las actividades de recolección, transporte, pesaje y clasificación de residuos aprovechables en el marco del servicio público de aseo.*
- 3. Proyectos que contribuyan al cumplimiento del Programa de Aprovechamiento establecido en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS, en el marco del servicio público de aseo.*

(Art. 3, Resolución 0547 de 2022)

Artículo 3. Proyectos de Tratamiento susceptibles de ser financiados con recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de residuos sólidos (IAT). Podrán financiarse con los recursos del Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos (IAT) los siguientes proyectos:

- 1. Estudios de prefactibilidad y factibilidad que permitan la implementación de proyectos de tratamiento, de acuerdo con los criterios de elegibilidad establecidos en la presente Resolución y el Anexo Técnico.*
 - 1.1. Elaboración de estudios ambientales cuando el proyecto de tratamiento requiera licencia ambiental.*

2. Construcción, optimización o ampliación de infraestructura, maquinaria y equipos asociados a las siguientes actividades:

2.1. Tratamiento térmico con fines de recuperación de energía, en proyectos de más de 100.000 toneladas por año, donde los residuos tengan un poder calorífico mayor o igual a 7 MJ/kg o menos de 100.000 ton/año, siempre y cuando se garantice su sostenibilidad.

2.2. Tratamiento Biológico para residuos orgánicos separados en fuente, con recolección y transporte selectivo en escalas mayores o iguales a 20.000 ton/año, siempre y cuando cuente con licencia ambiental.

2.3. Tratamiento Biológico para residuos orgánicos separados en fuente, con recolección y transporte selectivo en escalas menores a 20.000 ton/año, siempre que se garantice su sostenibilidad.

2.4. Tratamiento Mecánico Biológico de residuos previo a disposición final.

2.5. Tratamiento Mecánico Biológico de residuos ya dispuestos en sitios de disposición final.

Parágrafo. En ningún caso podrán financiarse con los recursos del Incentivo de Aprovechamiento y Tratamiento (IAT) proyectos, actividades o componentes asociados a campañas educativas o de sensibilización, compra de acciones o costos financieros, gastos de representación, viáticos, costos de transporte y, en general, costos de funcionamiento de la persona prestadora o de la operación del servicio.

Aunque la Resolución 0547 de 2022 no expone de forma directa las responsabilidades territoriales, estas se sustentan en los artículos 2.3.2.7.9 al 2.3.2.7.11 del Decreto 1077 de 2015 respecto a la forma en que deben radicarse sus proyectos, el cumplimiento de requisitos exigidos, la responsabilidad municipal en la evaluación de dichos proyectos y la forma en que se hará el recaudo y recibimiento de las sumas provenientes de las actividades de aprovechamiento y tratamiento

Plan Nacional de Negocios Verdes (PNNV)

El PNNV es el resultado de la alianza entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, las Corporaciones autónomas regionales, productores y otras entidades relacionadas con los negocios verdes en el país. Estos negocios se basan en actividades económicas que generan

EVALUACIÓN ECONÓMICA, TÉCNICA Y AMBIENTAL EN SISTEMAS DE COMPOSTAJE MUNICIPALES...

impactos ambientales positivos y buenas prácticas ambientales, sociales y económicas para la conservación del medio ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Figura 28
Categorías de Negocios Verdes

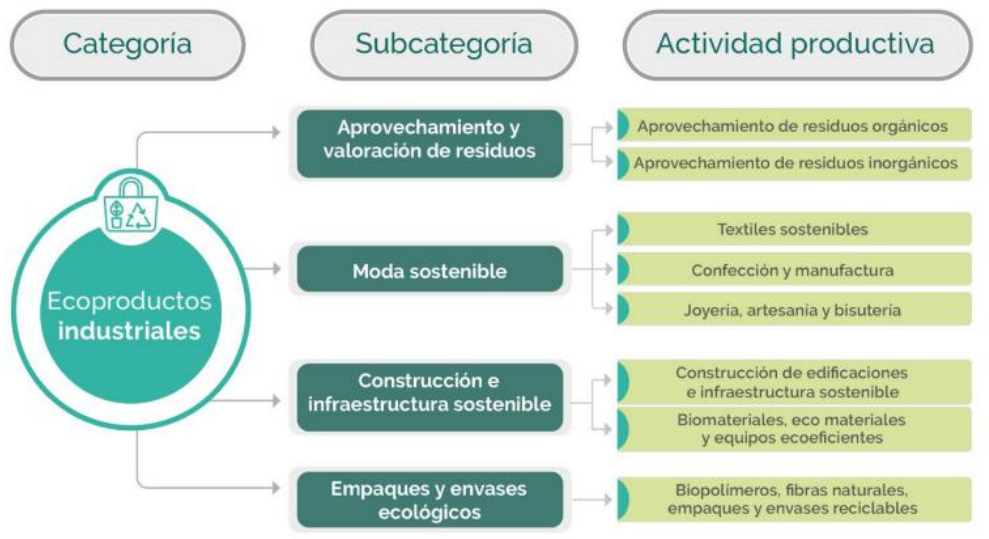


Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

La categoría de interés aplicable para el caso de estudio asociado a las composteras municipales corresponde a “Ecoproductos industriales”, definidos por ser aquellos bienes y servicios que demuestran que en su proceso productivo son menos contaminantes al medio respecto a otros productos, disminuyendo los residuos, siendo ecoeficientes y mediante el aprovechamiento de los ciclos productivos de los materiales.

Figura 29

Clasificación del compost como Ecoproducto industrial



Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

El aprovechamiento de residuos orgánicos es definido para aquellas actividades que aprovechan la biomasa residual para la obtención de subproductos como biomateriales, biofertilizantes y química verde en general. El compost, al ser un subproducto del aprovechamiento de residuos orgánicos que se reincorpora al ciclo económico y productivo en agricultura y jardinería principalmente, cumple con el enfoque de gestión integral de residuos evitando que una fracción orgánica vaya a disposición final, aportando a la reducción de gases de efecto invernadero. Aunque las plantas de compostaje municipales son potencialmente registrables, deben cumplir con los demás criterios, aclarando que no se considerarán como criterios aspectos ambientales y sociales que sean requisitos de ley, ya que se entiende que el mínimo requerido es cumplir con la legislación nacional e internacional aplicable (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). En ese orden, el cumplimiento de las metas de aprovechamiento establecidas en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) no constituyen por sí mismo un criterio diferenciador por motivo correspondiente a obligaciones legales.

El acceso a este instrumento de mercado debe ir acorde a diferentes criterios de aplicabilidad:

Viabilidad económica del negocio

Las ideas de negocio deben demostrar viabilidad económica, esencial para su transformación en empresas sostenibles. Esta viabilidad se evalúa analizando factores técnicos, legales, comerciales y organizativos. Se considera viable cuando las ventas cubren las necesidades financieras y permiten remuneraciones y distribuciones de utilidades.

Impacto ambiental positivo del bien o servicio:

Se debe demostrar que se impacta positivamente en el área de influencia, contribuyendo a aspectos de conservación y preservación de los servicios ecosistémicos. Estos impactos incluyen conservación, cambio de materiales renovables por no renovables, disminución de la contaminación, reducción de gases de efecto invernadero.

Enfoque de ciclo de vida del bien o servicio

Esta metodología permite evaluar el impacto ambiental del bien o servicio a lo largo de todas sus etapas (extracción, procesamiento de materias primas, forma de producción y uso, etc) cuantificando los recursos utilizados y emisiones generadas, buscando acciones correctivas y de mejora para la reducción de impactos y practicas sostenibles.

Vida útil

Consiste en el tiempo en el cual un bien, producto o servicio cumple correctamente con las funciones para la cual fue diseñado, teniendo criterios de desempeño, eficiencia y calidad, lo que implica que este bien o servicio requiere menos reemplazos, renovaciones y por lo tanto consumo de recursos.

De esta manera, podemos decir que la acción de incorporación del compost en el suelo es prolongada y mejora la estructura del suelo, como las plantas de compostaje con buenas prácticas

EVALUACIÓN ECONÓMICA, TÉCNICA Y AMBIENTAL EN SISTEMAS DE COMPOSTAJE MUNICIPALES...

de manejo suponen un ahorro de materiales y disminución de la presión sobre los recursos naturales, con la reducción de aplicación de fertilizantes químicos en ciertos sectores.

Sustitución de sustancias o materiales peligrosos

Las sustancias peligrosas son aquellas que utilizan o emplean compuestos peligrosos para la salud y el ambiente y, en ese orden de ideas, la reconfiguración de estos aspectos y los cambios en la tecnología logran su sustitución y mejoramiento en la sostenibilidad.

Reciclabilidad de los materiales y/o uso de materiales reciclados

Este aspecto se identifica cuando en la selección de materiales se consideran propiedades superiores a la del insumo convencional en cuanto a su recuperación y reincorporación. Desde la visión del compostaje, y para el caso de los residuos orgánicos, estos van más allá de cumplir su vida útil después de ser consumidos, sino que son reincorporados al ciclo para la formación de material fertilizante y dar continuidad a los procesos productivos.

Uso eficiente y sostenible de recursos para la producción del bien o servicio

Tiene en cuenta el uso eficiente y sostenible de los recursos (agua, energía, materias primas) empleándolos en la menor cantidad posible y con prácticas que eviten su desperdicio. El insumo principal utilizado en las plantas de compostaje proviene de la separación en la fuente que, por su composición y humedad, no suele requerir grandes cantidades de agua para el ajuste en sus parámetros.

Responsabilidad social al interior de la empresa

Se refiere a aquellas prácticas empresariales que garantizan condiciones laborales justas y de bienestar más allá del cumplimiento legal.

Responsabilidad social ambiental en la cadena de valor de la empresa

Obedece a la extensión de los principios de sostenibilidad y responsabilidad de la empresa, mas allá de sus propias operaciones, es decir, abarcando proveedores, aliados estratégicos y clientes para el desarrollo de una cadena de valor que adopte buenas prácticas ambientales y sociales.

Responsabilidad social y ambiental al exterior de la empresa

Se enfoca en la gestión de los impactos empresariales más allá de su operatividad, teniendo influencia en las comunidades, con los consumidores y la sociedad en general para potencia beneficios económicos, ambientales y sociales.

Comunicación de atributos sociales o ambientales asociados al bien o servicio

Este criterio busca que la información proporcionada por la empresa refleje la realidad de los procesos y su impacto, comunicando de forma clara y comprobable los diferentes beneficios del producto, esto parte también por proporcionar información que pueda inducir al error. En ese sentido, las tasas de aprovechamiento de residuos, reducción de GEI y toda comunicación deben ser verificables con información medida y llegar a actores relevantes.

Teniendo en cuenta estos criterios de accesibilidad y que el cumplimiento de las obligaciones normativas no es un criterio diferenciador aplicable, se debe demostrar que los estándares mínimos a cumplir son superados mediante la implementación voluntaria de prácticas, tecnologías de tratamiento o procesos adicionales que generen beneficios ambientales y sociales de forma medible y verificable. Se puede analizar si la adopción de sistemas de aireación con reducción de consumo energético, o la cuantificación voluntaria de GEI con metodologías avaladas y desarrollo de programas comunitarios, como también entrega de compost a agricultores locales y la implementación de diferentes programas que fortalezcan los criterios de aplicabilidad y den un valor agregado en términos de sostenibilidad.

En síntesis, el marco regulatorio y de mercado descrito habilita distintas fuentes de financiación y cofinanciación que pueden ser articuladas por las ESP y las entidades territoriales para estructurar, ampliar u optimizar proyectos de tratamiento y aprovechamiento de residuos. Estas fuentes combinan recursos tarifarios, ingresos por comercialización de subproductos y vehículos financieros y fiscales de orden nacional e internacional, con destinaciones específicas para inversión de capital y, en algunos casos, para cubrir costos de operación.

A continuación, se presenta un resumen de las principales fuentes y su destinación típica reportadas para el contexto colombiano.

Tabla 12

Fuentes de recursos para el desarrollo de proyectos de tratamiento de residuos en Colombia

Fuente	Destinación
Tarifa del servicio	Inversión y operación
Comercialización de subproductos	Inversión y operación
Incentivo al aprovechamiento y tratamiento (IAT) de residuos sólidos	Inversión
Exclusión IVA	Inversión
Innpulsa	Inversión
Bancodex	Inversión
Fondo solidaria y redistribución de ingresos	Inversión y operación
Fondo de adaptación al cambio climático	Inversión
Recursos internacionales	Inversión

Nota. Fuente (Breukers & Puentes, 2021)

Se evidencia que la mayoría de las fuentes de financiamiento identificadas están orientadas principalmente a cubrir los costos de inversión de los proyectos. Sin embargo, para garantizar la sostenibilidad de estas iniciativas en el largo plazo resulta indispensable asegurar también la cobertura de los costos de operación, evitando así que la infraestructura y los equipos adquiridos queden en desuso. En este sentido, se recomienda la creación y fortalecimiento de instrumentos económicos específicos destinados a la operación de los sistemas de tratamiento, dentro de los cuales cobra especial relevancia el Incentivo al Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos

Sólidos (IAT), dado que constituye un recurso de recaudo continuo, vinculado directamente a las toneladas dispuestas en relleno sanitario (Breukers & Puentes, 2021).

5.3 Evaluación ambiental

La evaluación ambiental se realizó con base en la generación y el aprovechamiento de residuos orgánicos en el municipio de Marinilla. Para ello, se utilizó la información consignada en los informes técnicos de control y seguimiento al Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del año 2023. En la *Tabla 13* se presenta la generación y el aprovechamiento de residuos orgánicos reportados por el municipio con corte a diciembre de 2023.

Se eligió este año como referencia porque el seguimiento a los PGIRS se realiza a año vencido, es decir, la información reportada en 2023 corresponde a la evaluación hecha durante 2024. Dado que el seguimiento al PGIRS 2024 se hizo de manera reciente, todavía no se dispone de datos oficiales sobre generación y aprovechamiento en el informe técnico. Por esta razón, la estimación de emisiones de GEI se fundamenta en la información del año 2023.

Esta información es útil porque permite cuantificar las emisiones asociadas a la disposición en relleno sanitario, bajo el supuesto de que la totalidad de los residuos orgánicos reportados son enviados directamente al relleno sin ningún tipo de tratamiento. En contraste, se consideran también las emisiones derivadas del proceso biológico de descomposición aerobia en el compostaje, que puede liberar dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006). No obstante, las emisiones de CO_2 no se contabilizan como aporte neto al cambio climático, al provenir del ciclo corto del carbono.

Con estos escenarios es posible calcular las emisiones evitadas gracias al compostaje, entendidas como la diferencia entre las emisiones potenciales que se generarían en un escenario de disposición en relleno sanitario y las emisiones efectivas del proceso de compostaje.

Tabla 13
Indicadores de generación y aprovechamiento de residuos del municipio de Marinilla (2023)

Mes	Cantidad de Residuos Orgánicos Generados (Toneladas/mes)	Cantidad de Residuos Orgánicos Aprovechados (Toneladas/mes)
Enero	280	75,3
Febrero	286,4	77,8
Marzo	314,1	75,94
Abril	314,1	66,24
Mayo	314,1	89,7
Junio	286,4	77,6
Julio	286,4	45,5
Agosto	286,4	34,1
Septiembre	332,73	52,7
Octubre	314,1	104,1
Noviembre	286,4	63,1
Diciembre	326,52	46,5
Total	3627,65	808,58

Nota. Fuente Informes técnicos Cornare

Para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los diferentes escenarios de gestión de residuos es necesario establecer factores de emisión, que relacionan la magnitud de una actividad con la cantidad de contaminante liberado. Estos factores permiten cuantificar las emisiones tanto en procesos de compostaje como en la disposición en relleno sanitario, y sirven de base para determinar las emisiones evitadas por el aprovechamiento. Posteriormente, las emisiones calculadas se convierten a toneladas de CO₂ equivalente (Ton CO₂-eq) a partir del producto entre el dato de emisión del compuesto y el potencial de calentamiento global (FUNDAGIEM, 2020).

Factor de emisión: Se entiende como un coeficiente que relaciona una actividad específica con la cantidad de sustancias emitidas a la atmósfera, lo cual permite estimar de manera cuantitativa las emisiones de un contaminante determinado.

5.3.1 Factores de emisión para compostaje

Para la estimación de las emisiones asociadas al compostaje se emplearon los factores de emisión por defecto establecidos en el IPCC (2006, Volumen 5, Capítulo 4, Tabla 4.1). Estos

corresponden a emisiones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), expresadas en gramos por kilogramo de residuo tratado (base húmeda).

Además, se menciona que las emisiones reales generadas en procesos de compostaje pueden variar según condiciones operativas como el tipo de residuo tratado, la proporción y calidad de materiales estructurantes (p. ej., astillas de madera, turba o aserrín), la temperatura alcanzada en las pilas, el contenido de humedad y la eficiencia de la aireación. Sin embargo, en ausencia de datos primarios, el método de Nivel 1 (Tier 1) propuesto por el IPCC recomienda utilizar los valores predeterminados de la *Tabla 14*, que constituyen un estándar internacional para estimar emisiones en este tipo de procesos.

Tabla 14

Factores de emisión por defecto para las emisiones de CH₄ y N₂O procedentes del tratamiento biológico de residuos

TABLE 4.1 DEFAULT EMISSION FACTORS FOR CH ₄ AND N ₂ O EMISSIONS FROM BIOLOGICAL TREATMENT OF WASTE					
Type of biological treatment	CH ₄ Emission Factors (g CH ₄ /kg waste treated)		N ₂ O Emission Factors (g N ₂ O/kg waste treated)		Remarks
	on a dry weight basis	on a wet weight basis	on a dry weight basis	on a wet weight basis	
Composting	10 (0.08 - 20)	4 (0.03 - 8)	0.6 (0.2 - 1.6)	0.24 (0.06 - 0.6)	Assumptions on the waste treated: 25-50% DOC in dry matter, 2% N in dry matter, moisture content 60%. The emission factors for dry waste are estimated from those for wet waste assuming a moisture content of 60% in wet waste.
Anaerobic digestion at biogas facilities	2 (0 - 20)	0.8 (0 - 8)	Assumed negligible	Assumed negligible	
Sources: Arnold, M. (2005) Personal communication; Beck-Friis (2002); Detzel <i>et al.</i> (2003); Petersen <i>et al.</i> 1998; Hellebrand 1998; Hogg, D. (2002); Vesterinen (1996). Note: Default emission factors for CH ₄ for anaerobic digestion already account for CH ₄ recovery.					

Nota. Fuente (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006)

Estos valores se expresan finalmente en unidades de kg de gas emitido por kg de residuo tratado, para mantener consistencia con el resto del estudio.

Tabla 15

Factores de emisión del compostaje

Factor de emisión del compostaje		
Gas Efecto Invernadero - GEI	Factor de emisión	Unidades
Metano (CH ₄)	0,004	Kg CH ₄ /Kg Residuo
Oxido nitroso (N ₂ O)	0,00024	Kg N ₂ O/Kg Residuo

Nota. Fuente (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006)

Se trabaja sobre el peso húmedo porque los datos de entrada de residuos en plantas municipales y en estadísticas oficiales (ej. PGIRS, inventarios) se reportan en peso fresco o húmedo y facilita la conversión directa entre toneladas de residuos tratados y emisiones estimadas, sin necesidad de convertir a base seca (que requiere caracterizaciones de laboratorio más detalladas).

5.3.2 Factor de emisión por residuos dispuestos en relleno sanitario

De acuerdo con el IPCC (2006, Volumen 5, Capítulo 3 – *Solid Waste Disposal Sites*), las emisiones de metano (CH₄) en sitios de disposición final se calculan mediante el modelo de decaimiento de primer orden (FOD, por sus siglas en inglés). Este enfoque se fundamenta en un balance de masa que considera las características de los residuos dispuestos, el contenido de carbono orgánico degradable (COD), la fracción efectivamente degradada (COD_f), el factor de corrección por manejo del sitio (FCM) y la fracción de CH₄ en el gas de vertedero (F).

En el informe de ejecución del convenio de asociación Masbosques–Fundagiem N.º 002-2020 se adoptó esta metodología, siguiendo las directrices del IPCC, para estimar las emisiones de GEI en rellenos sanitarios. Así, la producción de metano depende de la cantidad y categoría de los residuos, de la proporción de carbono disponible para degradación y de las condiciones anaerobias propias del relleno.

Las ecuaciones matemáticas que rigen este modelo de primer orden, presentadas en el Capítulo 3 del IPCC (2006), permiten expresar las emisiones anuales de CH₄ como función del tiempo, integrando los aportes de los residuos dispuestos en diferentes años y considerando factores como el índice de generación de metano (k), el factor de oxidación (OX) y el CH₄ recuperado (R).

$$ECH4 = ((A \times k \times RSUT \times RSUF \times FCM \times Lo \times e - k(T - x)) - R) \times (1 - OX)$$

$$Lo = FCM \times COD \times CODF \times F1612$$

Tomado de: (FUNDAGIEM, 2020)

Donde:

ECH4 = emisión de metano en Ton/año

A= factor de normalización para la corrección de la sumatoria

RSUT = total de residuos sólidos municipales generados (G/año)

RSUF = fracción o categoría de dichos residuos (Gg/año)

Lo = potencial de generación de metano (m3/Mg de residuos)

K = índice de generación de metano

T = año en transcurso

x= año de entrada de los residuos

F = fracción de CH4 en el gas de vertedero (se asume un valor de 0.5, pues el biogás se compone generalmente por 50% de gas CH4, 50% de CO2 y menos de 1% de otras trazas constituyentes)

R = CH4 recuperado (G/año)

OX = factor de oxidación (valor por defecto es 0)

FCM = factor de corrección para el metano, un ajuste de la estimación de biogás en el modelo que tiene en cuenta el grado de degradación anaerobia de los residuos, su valor está relacionado con la profundidad y tipo de relleno con el que se cuente.

El carbono orgánico degradable (DOC) es el parámetro que representa la fracción de carbono presente en los residuos que puede descomponerse biológicamente bajo condiciones anaerobias. Su valor depende directamente de la composición de los residuos sólidos municipales y puede calcularse a partir del porcentaje promedio de carbono degradable de cada componente, aplicando la ecuación establecida por el IPCC.

$$COD = 0.4(F) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D)$$

Donde:

F = porcentaje de residuos de papel, cartón y textiles

B = residuos de desecho de jardín, parques o desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)

C = porcentaje de los residuos que corresponde a restos de alimentos

D= porcentaje de residuos que corresponde a madera y paja.

En los municipios donde no se dispone de una caracterización reciente de residuos, el cálculo del DOC se realizó mediante escenarios de simulación, utilizando los promedios de generación reportados por otros municipios de la región. Para ello, se mantuvieron constantes **los** factores propios del proceso de degradación, los factores de corrección y las condiciones ambientales, de acuerdo con la información disponible. La *Tabla 16* presenta la composición adoptada para el municipio de referencia, expresada en porcentajes por tipo de residuo.

Tabla 16

Composición de residuos adoptada para municipios de referencia de la jurisdicción Cornare

Tipo de residuo	Porcentaje
Vidrio, plástico, metal, otros inorgánicos	30%
Papel, cartón	10%
Textiles	5%
Orgánicos	55%

Nota. Fuente (FUNDAGIEM, 2020)

Así mismo, se menciona que CODF es la fracción de carbono orgánico degradable asimilado o que se convierte en biogás, el valor predeterminado utilizado por el IPCC es de 0.50. Sin embargo, este puede variar de 0.42 para 10°C a 0.98 para 50°C.

En relación con la fracción de metano en el gas del relleno sanitario (F), el IPCC (2006, Volumen 5, Capítulo 3 – *Solid Waste Disposal Sites*) indica en el apartado *Fraction of CH₄ in Generated Landfill Gas (F)* que la mayoría de los residuos en los sitios de disposición final generan un biogás compuesto aproximadamente por 50 % de CH₄ y 50 % de CO₂, con pequeñas trazas de otros gases. Solo en casos particulares, como aquellos en los que el material contiene cantidades

significativas de grasa o aceite, la proporción de CH₄ puede superar sustancialmente ese valor. Por lo anterior, en este estudio se adopta el valor por defecto F = 0,5.

Cabe señalar que, aunque el biogás generado en los rellenos sanitarios está compuesto aproximadamente por 50 % de metano y 50 % de dióxido de carbono, en los inventarios de GEI únicamente se contabilizan las emisiones de CH₄. Esto se debe a que el CO₂ emitido proviene del carbono previamente fijado por la biomasa, por lo que no representa un aumento neto en la atmósfera. Además, el CO₂ derivado de la actividad microbiana se utiliza como un indicador de la estabilidad o madurez de los sustratos orgánicos, más que como un gas de efecto invernadero (FUNDAGIEM, 2020)

En cuanto al factor de oxidación (OX), se adopta un valor de 0, en concordancia con lo establecido en la *Tabla 17* correspondiente al IPCC (2006, Capítulo 3), donde se recomienda este valor como predeterminado para sitios de disposición de residuos. Si bien en rellenos sanitarios bien gestionados, con coberturas gruesas y adecuadamente aireadas, podría justificarse un valor de 0,1, la ausencia de estudios representativos en el contexto nacional o regional impide sustentar dicho ajuste. Mantener OX = 0 garantiza consistencia metodológica, evita sobreestimar la capacidad de oxidación de las coberturas y responde al principio de conservadurismo recomendado para los inventarios de GEI.

Tabla 17
Factores de oxidación para disposición final de residuos sólidos

TABLE 3.2 OXIDATION FACTOR (OX) FOR SWDS	
Type of Site	Oxidation Factor (OX) Default Values
Managed ¹ , unmanaged and uncategorised SWDS	0
Managed covered with CH ₄ oxidising material ²	0.1
¹ Managed but not covered with aerated material	
² Examples: soil, compost	

Nota. Fuente (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006)

El factor de corrección de metano (FCM) reconoce que la cantidad de CH₄ generado en los sitios de disposición final de residuos depende directamente del grado de control y de las condiciones de operación del sitio. De acuerdo con el IPCC (2006, Volumen 5, Capítulo 3 – *Solid Waste Disposal Sites*), los sitios no gestionados tienden a producir menos metano a partir de una misma cantidad de residuos que aquellos gestionados bajo condiciones anaerobias, debido a que en la capa superior de los primeros predomina la descomposición aeróbica.

En los sitios no gestionados de mayor profundidad o con niveles freáticos altos, la proporción de residuos que se degrada aeróbicamente es menor que en los botaderos superficiales, lo cual implica una mayor generación de CH₄. Por otra parte, los sitios de disposición gestionados semi-aeróbicamente incorporan aire de manera pasiva en la masa de residuos, lo que favorece la creación de un entorno semi-aeróbico que reduce la formación de metano en comparación con los rellenos estrictamente anaerobios (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006).

Tabla 18
Clasificación y factores de corrección de metano (FCM)

TABLE 3.1 SWDS CLASSIFICATION AND METHANE CORRECTION FACTORS (MCF)	
Type of Site	Methane Correction Factor (MCF) Default Values
Managed – anaerobic ¹	1.0
Managed – semi-aerobic ²	0.5
Unmanaged ³ – deep (>5 m waste) and /or high water table	0.8
Unmanaged ⁴ – shallow (<5 m waste)	0.4
Uncategorised SWDS ⁵	0.6

Nota. Fuente (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006)

Finalmente, con base a la información presentada, se adopta como referencia el siguiente factor de emisión para residuos dispuestos en relleno sanitario.

Tabla 19

Factor de emisión de residuos dispuestos en relleno sanitario

Factor de emisión de residuos dispuestos en relleno sanitario		
Gas Efecto Invernadero - GEI	Factor de emisión	Unidades
Metano (CH ₄)	0,05497667	Kg CH ₄ /Kg residuo

Nota. Fuente (FUNDAGIEM, 2020)

Este valor representa el potencial de generación de metano por unidad de residuo orgánico dispuesto, calculado a partir de los parámetros por defecto del IPCC y ajustado según las condiciones locales consideradas en el informe de ejecución del convenio de asociación MASBOSQUES-FUNDAGIEM.

5.3.3 Potencial de calentamiento global

El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es un indicador que permite comparar el efecto climático de distintos gases de efecto invernadero (GEI) en relación con el dióxido de carbono (CO₂), el cual se toma como referencia con un valor de 1. Este parámetro considera tanto la capacidad de cada gas para atrapar radiación en la atmósfera (forzamiento radiativo) como su tiempo de permanencia en ella.

En este estudio se adoptan los valores reportados en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2021), con un horizonte temporal de 100 años (GWP100), los cuales se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

Valores de Potencial de Calentamiento global

Gas Efecto Invernadero - GEI	Potencial de calentamiento global (PCG)
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	27,0 ± 11
Óxido nitroso (N ₂ O)	273±130

Nota. Fuente <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/#7.6> (IPCC, 2006)

5.3.4 Cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero – GEI

A continuación, se relaciona el modelo matemático para el calculo de las emisiones asociadas a la gestión de residuos orgánicos en relleno sanitario, en tratamiento por compostaje y consecutivamente las emisiones evitadas de GEI por el tratamiento de residuos orgánicos.

- **Emisión de GEI de residuos orgánicos en relleno sanitario:**

$$\text{Emisiones de RO en RS} = ((FE_{CH_4 RS} \times PCG_{CH_4}) + (FE_{N_2O RS} \times PCG_{N_2O})) \times RO$$

Donde;

Emisiones RO en RS = Emisiones de Residuos Orgánicos en relleno sanitario, Ton CO2e/año

FE CH₄ RS = Factor de emisión de metano en relleno sanitario anaerobio, Ton CH₄/Ton residuo*año

PCG CH₄ = Potencial de calentamiento global del metano

FE N₂O RS = Factor de emisión del óxido nitroso en relleno sanitario anaerobio, Ton N₂O/Ton residuo*año

PCG N₂O = Potencial de calentamiento global del óxido nitroso

RO = Cantidad total de residuos orgánicos que se suponen como dispuestos en relleno sanitario, Ton/año

- **Emisión de GEI de residuos orgánicos en proceso de tratamiento por compostaje:**

$$\text{Emisiones de RO en compostaje}$$

$$= ((FE_{CH_4 comp} \times PCG_{CH_4}) + (FE_{N_2O comp} \times PCG_{N_2O})) \times RO$$

Donde;

Emisiones tratamiento de RO en compostaje = Emisiones asociadas al tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje, Ton CO2e/año

FE CH₄ comp: Factor de emisión de metano en compostaje, Ton CH₄/Ton residuo*año

PCG CH₄: Potencial de calentamiento global del metano

FE N₂O comp: Factor de emisión del óxido nitroso en compostaje, Ton N₂O/Ton residuo*año

PCG N₂O: Potencial de calentamiento global del óxido nitroso

RO: Cantidad total de residuos orgánicos tratados mediante compostaje, Ton/año

- **Emisiones evitadas de GEI por el tratamiento de residuos orgánicos:**

$$\text{Emisiones evitadas} = \text{Emisiones de RO en RS} - \text{Emisiones de RO en compostaje}$$

Donde:

Emisiones evitadas: Emisiones evitadas por el tratamiento de residuos orgánicos asociadas al proyecto Mejoragro, Ton CO₂e/año.

Emisiones RO en RS: Emisiones de Residuos Orgánicos en relleno sanitario, Ton CO₂e/año.

Emisiones tratamiento de RO en compostaje: Emisiones asociadas al tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje, Ton CO₂e/año.

5.3.5 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la evaluación de los escenarios de gestión de residuos sólidos orgánicos para 2023 en el municipio de Marinilla. Estos escenarios consideran tanto la disposición en relleno sanitario como el tratamiento mediante compostaje, con el fin de cuantificar las emisiones generadas en cada caso y determinar las emisiones evitadas por la implementación de procesos de aprovechamiento.

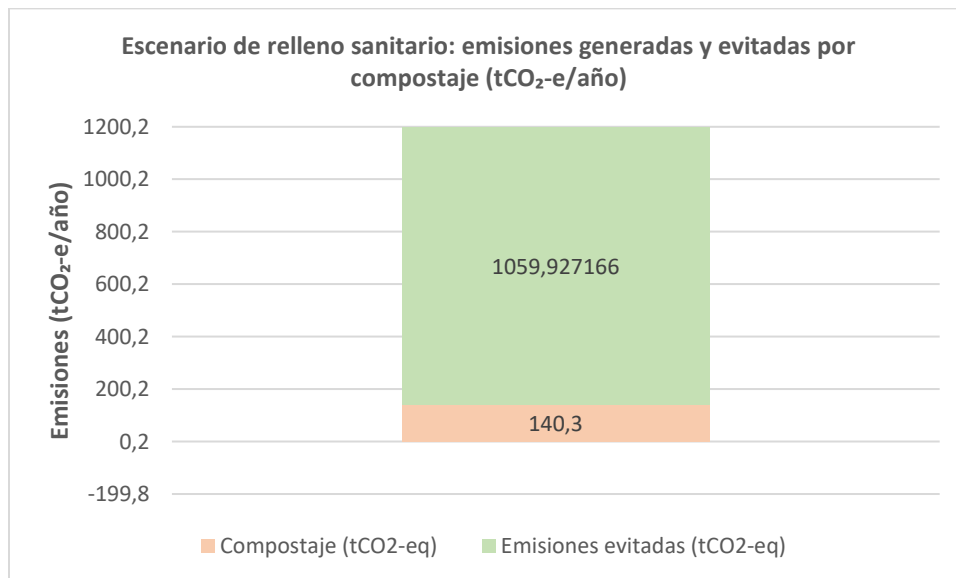
Tabla 21

Resultados de emisiones supuestas por disposición en relleno, emisiones por compostaje y emisiones evitadas por tratamiento de residuos orgánicos

Emisiones supuestas residuos orgánicos dispuestos en relleno sanitario (Ton CO ₂ e/año)	1200,231967
Emisiones de los residuos tratados en compostaje (Ton Co ₂ e/año)	140,3048016
Emisiones evitadas de GEI por el tratamiento de residuos organicos	1059,927166

Figura 30

Escenario de relleno sanitario: emisiones generadas y evitadas por compostaje



Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje tiene un efecto notable en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En un escenario de disposición en relleno sanitario, las emisiones asociadas alcanzarían aproximadamente 1200,23 Ton CO₂ e/año, mientras que el compostaje solo genera 140,30 Ton CO₂ e/año. Esta diferencia corresponde a 1059,9 Ton CO₂ e/año de emisiones evitadas, lo que equivale a una reducción cercana al 88 %.

La magnitud de esta reducción evidencia que el compostaje no solo constituye una alternativa viable para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos, sino también una estrategia con alto impacto en la mitigación del cambio climático. Adicionalmente, los beneficios ambientales derivados de la producción de compost como enmienda orgánica se complementan con este aporte en términos de reducción de GEI, reforzando su papel dentro de los lineamientos de economía circular y gestión sostenible de residuos.

En este sentido, los hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer la operación de las plantas municipales de compostaje y de garantizar procesos eficientes y continuos. Solo bajo estas condiciones es posible consolidar el potencial del compostaje como medida de gestión ambiental que contribuye de manera efectiva a los compromisos nacionales e internacionales de reducción de emisiones y adaptación frente al cambio climático.

6. Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo del presente trabajo permitió evidenciar que las plantas de compostaje municipales constituyen una alternativa viable para la gestión de residuos orgánicos, pues contribuyen tanto a la reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios como a la generación de un subproducto con valor agregado para la agricultura. El análisis realizado en la planta de Marinilla muestra que, aun con las limitaciones de información y con un alcance enfocado principalmente en los costos de operación y la venta de subproductos, es posible identificar un panorama económico favorable y con potencial de fortalecimiento.

En términos de costos de operación, se determinó que el procesamiento de un módulo de aproximadamente 40 toneladas de material orgánico, con un aprovechamiento efectivo del 35 %, demanda alrededor de 269 horas-hombre, lo que equivale a un costo de mano de obra de \$1,82 millones por módulo, o \$6.066 por bulto de 40 kg de compost. Al integrar el insumo de costales, el costo total asciende a un rango entre \$7.017 y \$7.186 por bulto, valores que se mantienen muy por debajo del precio de venta vigente de \$12.000, generando un margen operativo bruto cercano al 40 %. Este resultado evidencia que, desde el punto de vista económico, la operación de la planta es sostenible y puede cubrir sus costos básicos, aunque todavía es necesario incluir insumos

adicionales, consumo energético, costos de transporte de residuos e insumos y mantenimiento para tener datos reales consistentes.

El análisis también permitió identificar los puntos críticos del proceso: la recepción, clasificación y llenado de módulos concentra más del 50 % de la carga operativa, seguida por el triturado y cernido, que representa cerca de una cuarta parte del total, si bien no es la tarea que mas peso trae, lleva consigo tiempos por la capacidad de la máquina, Esto indica que la eficiencia de la planta depende en gran medida de estas fases, y que cualquier mejora en ellas puede tener un impacto significativo en la reducción de costos. Además, el uso de maquinaria propicia significativamente los tiempos, esto se demuestra a partir de la comparación del cerrado de costales con maquina cerradora vs cerrado a mano, el cual supera los 3-4 minutos de diferencia por cerrado a mano con la posibilidad de mejora en el llenado del bulto con un peso de 40 Kg.

Por otra parte, el estudio de la venta de subproductos reveló que el compost aún enfrenta retos importantes de mercado. La ausencia de certificación del ICA limita la confianza del consumidor y repercute en el precio de venta, mientras que la baja visibilidad del producto en los mercados locales obliga a fortalecer las estrategias de publicidad, mercadeo y búsqueda de nuevos canales de distribución. En este sentido, la sostenibilidad a largo plazo no solo depende de mantener márgenes positivos de operación, sino también de consolidar la imagen del producto, la confianza del consumidor y el acceso a mercados más amplios.

La experiencia analizada evidencia que, si bien el tratamiento dentro del servicio público de aseo se plantea como una actividad con potencial ambiental y social, su consolidación depende en gran medida de la forma en que se estructuren los mecanismos de financiación. El hecho de que los prestadores no logren alcanzar la sostenibilidad financiera indica que la actividad aún no cuenta con un marco tarifario suficientemente robusto, lo cual dificulta que se garantice su permanencia en el tiempo y limita la expansión de proyectos de este tipo en el país.

En este sentido, resulta necesario avanzar hacia una metodología tarifaria que reconozca la especificidad del tratamiento y lo equipare con las demás actividades del SPA, de tal manera que el prestador reciba una remuneración justa por el servicio que presta. La venta de subproductos,

como el compost, puede constituirse en una fuente de ingresos adicional, pero no debe considerarse como la base que sustente la operación, dado que su comportamiento depende de factores externos como la dinámica del mercado y la aceptación del producto.

Otro aspecto fundamental es reconocer que los prestadores no operan bajo condiciones homogéneas. Existen diferencias significativas en el nivel de inversión requerido, en las tecnologías disponibles y en los costos de operación asociados. Por ello, los criterios de remuneración no pueden ser uniformes, sino que deben adaptarse a la diversidad de contextos y a las particularidades de cada sistema. Solo de esta forma se podrá construir un esquema tarifario que sea equitativo, incentive la operación eficiente y garantice que el tratamiento de residuos dentro del SPA sea técnica, ambiental y financieramente sostenible.

En conclusión, el trabajo demuestra que la planta de compostaje de Marinilla, y en general las plantas municipales de la región, tienen el potencial de convertirse en piezas clave dentro de la estrategia de economía circular y gestión sostenible de residuos. No obstante, para garantizar su permanencia y consolidación, es indispensable avanzar en aspectos de certificación, formalización comercial y fortalecimiento de la gestión administrativa y operativa, de manera que el compost producido sea competitivo, rentable y capaz de aportar beneficios tanto ambientales como sociales y económicos en el territorio.

Referencias

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2023). *Manual de compostaje - Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/cartillas/Manual%20de%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20Organicos.pdf>

Breukers, L., & Puentes, F. (2021). *Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo. Informe final - Reporte de conclusiones, recomendaciones y consideraciones regulatorias*.

Congreso de Colombia. (2015). *Ley 1753 de 2015*. Diario Oficial, Iso 19152.
Cornare. (2017). *Acuerdo* No. 362.
https://www.cornare.gov.co/Acuerdos/Acuerdo_362_de_2017_cornare.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2023). *Cobertura de recolección de basura*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?u=0&t=39&servicio=2297>

Docampo, R. (2013). *Compostaje y compost*. INIA Las Brujas.

Empresas Públicas de San Rafael S.A ESP. (s. f.). *Manual de procesos y procedimientos de la planta de compostaje del municipio de San Rafael*.

FUNDAGIEM. (2020). *Informe de ejecución del convenio de asociación MASBOSQUES-FUNDAGIEM N° 002-2020*.

Función Pública. (2016). *Decreto 1625 de 2016, «Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario en Materia Tributaria»*.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006). *Capítulo 3 - Disposición de residuos sólidos*.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006). *Capítulo 4 - Tratamiento biológico de residuos sólidos*.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 5 - Desechos*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>

ICONTEC. (2022). *NTC 5167: Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Bogotá.

ICONTEC. (2022). *NTC 5167:2022 - Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.* <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-productos-para-la-industria-agricola-productos-organicos-usados-como-abonos-o-fertilizantes-y-enmiendas-o-acondicionadores-de-suelo-ntc5167-2022.html>

IPCC. (2006). *Chapter 7: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity.*

IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 5: Desechos.*

Marmolejo, L., Torres, P., Oviedo, E., Bedoya, D., & Amezquita, C. (2009). *Flujo de residuos: Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales.* <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323541009>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Plan Nacional de Negocios Verdes 2014-2022.* <https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/plan-nacional-de-negocios-verdes/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Plan Nacional de Negocios Verdes 2022-2030.*

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2022). *Datos sobre el metano.* <https://www.unep.org/es/explore-topics/energy/datos-sobre-el-metano>

Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, experiencias en América Latina.* www.fao.org/publications

EVALUACIÓN ECONÓMICA, TÉCNICA Y AMBIENTAL EN SISTEMAS DE COMPOSTAJE MUNICIPALES...

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). *Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2023*.