



Cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en el Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín

Mayra Liseth Gallego Lujan

Proyecto de práctica presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Sanitaria

Asesor

Carlos Esteven Pulgarín Muñoz, Ingeniero Sanitario

PhD (c) en Ingeniería Ambiental.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2023

Cita	(Gallego Lujan, 2022)
Referencia	Gallego Lujan, M. (2022). <i>Cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en el Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín. [Prácticas académicas profesionales]. Universidad de Antioquia, Medellín.</i>
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

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

Este proyecto que es un reflejo de toda mi vida académica, con aprendizajes, triunfos y derrotas está dedicado en primer lugar a mis padres don José y doña Rosa, por todas aquellas horas extras en el trabajo para darme el mejor regalo que un padre puede dar a su hija: educación, y a mi madre por todas las madrugadas a prepararme la “coquita” del almuerzo, nunca olvidaré sus palabras cuando decaía y me decían que aunque soy de talla pequeña, mi corazón, mi mente y mis sueños son gigantes y con ellos alcanzaría todo lo que me propusiera; en segundo lugar a mi esposo Johan, quien nunca me dejó desistir, siempre resaltó mis habilidades y con entereza y determinación siempre apoyó mis sueños, corrigió mis defectos y soportó aquellos momentos donde mi tiempo y dedicación estaban enfocados en su totalidad a mi procesos académico.

Agradecimientos

“La gratitud, como ciertas flores, no se da en la altura y mejor reverdece en la tierra buena de los humildes” (José Martí)

Mi primera expresión de agradecimiento es para Dios, sin su presencia en mi vida tal vez no habría transitado este camino de aprendizaje y superación, en segundo lugar agradezco a los docentes de la Escuela Ambiental quienes desde su experiencia profesional y personal forman personas integras a la vanguardia de los desafíos del día a día, un especial agradecimiento a mi asesor, el profesor Esteven Pulgarín por siempre estar atento a mis inquietudes y que el desarrollo de mi proceso rindiera frutos de calidad; también agradezco a la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito de Medellín, especialmente a mi asesora Sara Restrepo, por siempre estar pendiente de mi proceso, guiarme y mostrarme un panorama laboral lleno de pasión y entrega por lo que se hace; y por ultimo pero no menos importante agradezco a toda la comunidad de la Universidad de Antioquia, no cambiaría por nada la experiencia de vivir mis años de formación académica aquí, forjaron en mí una mejor persona con sentido de pertenencia, con pensamiento crítico y con una mirada al bienestar social.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Marco teórico	14
3.1 Metodologías usadas en los Sistemas de Aprovechamiento (SA) del distrito	14
3.1.1 Compostaje	14
3.1.2 Paca biodigestora	15
3.2 Transformación de residuos orgánicos y economía circular	15
3.2.1 Fortalecer el cambio hacia modelo de economía circular	16
3.2.2 Aumentar el aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en el municipio de Medellín	17
3.2.3 Implementación de alternativas de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos según viabilidad, incluyendo estimación del potencial de reducción de GEI	17
3.3 Herramienta para el cálculo de emisiones	17
4. Metodología	24
4.1 Etapa 1: Recolección de información	24
4.2 Etapa 2: Depuración de datos	24
4.3 Etapa 3: Calculo de emisiones	24
• Escenario 1 (E1) “No aprovechamiento”	25
• Escenario 2 (E2) “Si aprovechamiento”	25
4.4 Etapa 4: Análisis de resultados	26
5. Resultados y Análisis	27

5.1 Depuración de los datos	27
5.1 Cálculo de emisiones	28
5.2 Cálculo de indicadores de aprovechamiento	31
6. Conclusiones	35
7. Referencias	36

Lista de tablas

Tabla 1: Distribución territorial de los sistemas de aprovechamiento en el Distrito de Medellín	27
Tabla 2: Distribución sectorial de los sistemas de aprovechamiento en el distrito de Medellín...	27
Tabla 3: Características de los sistemas de aprovechamiento en el distrito de Medellín.....	27
Tabla 4: Compilado caracterización de los residuos en el Relleno Sanitario la Pradera	28
Tabla 5: Datos necesarios para el cálculo de indicadores	31
Tabla 6: Resultados de indicadores de aprovechamiento con los sistemas de aprovechamiento .	32

Lista de figuras

Figura 1: Definición del tipo de proyecto a realizar y la categoría de acción	18
Figura 2: Definición temporal del proyecto.....	18
Figura 3: Distancia entre el distrito de Medellín y el Relleno Sanitario la Pradera.....	23
Figura 4: Pantallazo del IIAT para las diferentes cantidades de residuos generadas en los años de estudio	28

Lista de ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo del Indicador 1	16
Ecuación 2: Cálculo del Indicador 2	17
Ecuación 3: Cálculo del Indicador 3	17
Ecuación 4: Ecuaciones primarias.....	19
Ecuación 5: Cálculo de los factores de emisión para el a) Metano y b) Óxido Nitroso.....	21
Ecuación 6: Eficiencia de los camiones recolectores.....	22

Lista de mapas

Mapa 2: Ubicación de los diferentes Sistemas de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en el distrito de Medellín	34
---	----

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
C40	Grupo de Liderazgo Climático de Ciudades
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CH₄	Metano
CIRIS	Sistema de información e informes de inventario de la ciudad
CNG	Gas natural comprimido
CO₂	Dióxido de Carbono
CORANTIOQUIA	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
E1	Escenario 1
E2	Escenario 2
EMVARIAS	Empresas Varias de Medellín
Eq	Equivalentes
FE	Factores de Emisión
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IAT	Integrated Impacts Assessment
INGEI	Inventario de Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
N₂O	Óxido Nitroso
NAMA	Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación
PAC	Plan de Acción Climática
PGIRS	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos
SA	Sistemas de Aprovechamiento
SMA	secretaría de Medio Ambiente
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
Ton	Toneladas
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Resumen

En el distrito de Medellín se disponen en el Relleno Sanitario la Pradera alrededor 687.252 toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales aproximadamente el 62,42% corresponde a material que puede ser aprovechado y tratado mediante metodologías que utilizan técnicas como el compostaje y las pacas biodigestores, con lo que se contribuiría a minimizar el impacto ambiental por los gases de efecto invernadero - GEI que se emiten desde el relleno sanitario; y en este sentido contribuir a la transición hacia un modelo económico circular; debido a la importancia de cuantificarlos, durante el desarrollo de esta práctica de industria en ingeniería sanitaria se realizó el cálculo de las emisiones provenientes de los diferentes sistemas de aprovechamiento de residuos orgánicos a partir de actividades propuestas en el PGIRS 2020-2027, para la evaluación de la implementación de un modelo de economía circular en el Distrito de Medellín, utilizando la herramienta Impacts Assessment Tool del Grupo de Liderazgo Climático de Ciudades C40; con la información obtenida se pudo afirmar que es totalmente viable la gestión y el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante estos sistemas de aprovechamiento y su rol en la reducción de gases de efecto invernadero emitida por el relleno sanitario y su rol en el camino hacia la circularidad y sostenibilidad en el Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Palabras clave: Residuos sólidos orgánicos, compostaje, pacas biodigestoras, emisiones de gases de efecto invernadero, indicadores, economía circular, reducciones, aprovechamiento

Abstract

In the district of Medellín, approximately 687,252 tons of solid waste are disposed of in the La Pradera Landfill each year, of which approximately 62.42% corresponds to material that can be used and treated through methodologies that use techniques such as composting and biodigester bales, which would contribute to minimize the environmental impact of greenhouse gases - GHG emitted from the landfill and contribute to the transition towards the circular economic model; due to the importance of quantifying them, during the development of this industry internship in sanitary engineering, the calculation of emissions from the different systems of Use -SA of organic waste from activities proposed in the PGIRS 2020-2027, for the evaluation of the implementation of a circular economy model in the District of Medellín, using the Impacts Assessment Tool of the C40 Cities Climate Leadership Group, was carried out; With the information obtained, it was possible to affirm that the management and use of organic waste by means of these SA and their role in the reduction of greenhouse gases emitted in the landfill and their role in the path towards circularity and sustainability in the Science, Technology and Innovation District is totally viable.

Keywords: Organic solid waste, Composting, Biodigester bales, Greenhouse gases, Indicators, Circular Economy, Emissions, Reductions, Utilization, Recycling

1. Introducción

La población mundial es más de tres veces mayor que a mediados del siglo XX. La población mundial alcanzó los 8000 millones a mediados de noviembre de 2022 (Naciones Unidas, 2022); y debido a este incremento, el cambio en sus patrones de consumo y el aumento de los niveles de ingreso, se ha modificado de manera sustancial la cantidad y composición de los residuos sólidos urbanos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe- CEPAL, 2015); sin una adecuada gestión de los desechos, estos terminan en rellenos sanitarios, incinerados, en las riberas de ríos y quebradas o en esquinas que se convierten en focos de contaminación puntual; como producto de la degradación de estos residuos se emiten y acumulan gases de efecto invernadero en la atmósfera como lo son siendo su acumulación el principal responsable del cambio climático, debido a su capacidad para absorber y remitir radiación infrarroja, entre los principales actores están el Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) y el Óxido Nitroso (N_2O) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales et al., 2015)

Las emisiones GEI de Colombia corresponden aproximadamente al 0,4% del total de emisiones mundiales y se sitúa en el puesto 5 de emisiones GEI entre 32 países de Latinoamérica y el Caribe. Brasil, México y Argentina son los principales emisores de este grupo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales et al., 2015); Como consecuencia de esto desde el 2007, Colombia suscribió al plan de las Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMA), por sus siglas en inglés, que se convierten en acciones que reducen las emisiones de GEI y que, a su vez, contribuyen a alcanzar los Objetivos de desarrollo Sostenible (Alcaldía de Medellín, 2020).

En la actualidad los medellinenses generan en promedio 0,54 kg per cápita de residuos sólidos al día, valor que parece haberse normalizado a partir del 2011 luego de una tendencia creciente que se venía presentando desde el 2006 (Alcaldía de Medellín, 2020). Dado que Colombia es un país tropical y a lo largo del año presenta producción agropecuaria, las familias pueden acceder a alimentos frescos para su consumo. Esta particularidad hace que la mayor fracción de los residuos diarios que genera cada habitante de la ciudad sea de carácter orgánico, alcanzando un 40 % del total (Alcaldía de Medellín, 2019). Sin embargo, pese a que la mayor parte de los residuos

que se generan son orgánicos, la proporción de reciclables no es despreciable, pues alcanza un 27 % del total de composición de los residuos generados, según la caracterización 2018-2019. Este porcentaje incluye residuos de plástico, vidrio, textiles, cartón, papel y metales. Según lo anterior, la ciudad cuenta con un potencial de aprovechamiento alto, y esto hace que el sector de residuos, según el Inventario de Gases de Efecto Invernadero, realizado para el año 2015, esté en el tercer lugar en emisiones, superado solo por los sectores energía estacionaria y transporte (Alcaldía de Medellín, 2020).

En Medellín las consecuencias de una inadecuada gestión de los residuos sólidos, se evidencia claramente en su afectación al paisaje, en el deterioro de la matriz suelo, en el daño a fuentes hídricas, en problemas para la salud de la población y otros a nivel económico (Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS, 2020).

El Relleno Sanitario La Pradera es el lugar de disposición final de los residuos sólidos del Distrito de Medellín, que de Colombia es la tercera ciudad que mayor cantidad de residuos sólidos dispuso, con una cantidad de 687.252 Ton en el 2019 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios- SSPD, 2020). Con base en la información suministrada por Emvarias S.A. E.S.P. (2020), citado en la actualización del PGIRS de Medellín 2020-2027, sobre composición porcentual de residuos caracterizados en el Relleno Sanitario La Pradera, en los años 2011, 2014, 2019 la mayor fracción de residuos corresponde a la materia orgánica con porcentajes de, 55,1%, 47,2% y 67,7% respectivamente, seguido de los residuos reciclables, ordinarios, especiales y en menor proporción los peligrosos. Los datos expuestos en los años de estudio corroboran que aún se tienen grandes falencias en la gestión diferenciada y aprovechamiento de residuos, pues de la cantidad total de residuos que llegan al relleno sanitario, un porcentaje superior al 60% podría tener un aprovechamiento (entre residuos reciclables y orgánicos), lo que generará una reducción sustancial de la vida útil del relleno sanitario e implica costos de transporte y disposición final que podrían ser evitados.

Por tanto, es necesario transformar la utilidad de estos residuos, vinculándolos a procesos ambientales y ciclos en los cuales se valoricen y brinden beneficios al ambiente y a la región, de donde nace la importancia de desarrollar estrategias que permitan convertir estos residuos en recursos para minimizar el impacto causado al ambiente promoviendo así un desarrollo sostenible

(Vera & Jaramillo, 2019) mediante la incorporación de un modelo de economía circular, cuyo enfoque ambiental se interesa por reducir del sistema de producción-consumo la utilización de materiales vírgenes y de energía debido a que los recursos de los sistemas son usados muchas veces y no solo una. Además, reducir la generación de residuos y emisiones mediante la aplicación de ciclos de materiales y energías renovable (Korhonen et al., 2018); y con todo esto lograr una ciudad sostenible y alcanzar las metas del Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020-2023 y del PGIRS distrital.

Consciente de los desafíos, Medellín reconoce la necesidad de transformarse ante la transición climática y se suma a los esfuerzos de los de los gobiernos subnacionales para mitigar el cambio climático, generar resiliencia y reducir la vulnerabilidad frente a los efectos del clima (Alcaldía de Medellín, 2020). Con el apoyo del Grupo de Liderazgo Climático de Ciudades –C40- el distrito ha trazado una hoja de ruta con el propósito de construir una ciudad carbono neutro para 2050.

C40 es una red de alcaldes de casi 100 ciudades líderes en el mundo que colaboran para brindar la acción urgente que se necesita en este momento para enfrentar la crisis climática, y así crear un futuro en el que todos, en todas partes, puedan prosperar; la misión de C40 es reducir a la mitad las emisiones de sus ciudades miembro dentro de una década, al tiempo que mejora la equidad, aumenta la resiliencia y crea las condiciones para que todos, en todas partes, prosperen (C40 Cities, 2022).

Cuando se aborda de manera holística, la gestión sostenible de residuos y materiales puede ayudar a las ciudades a reducir entre un 15 y un 20 % de sus emisiones mediante la gestión, el reciclaje, el tratamiento (C40 Cities, 2022b).

Con el propósito de evaluar la implementación del modelo de economía circular a partir de actividades de aprovechamiento propuestas en el PGIRS del Distrito de Medellín, se calcularán emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de diferentes sistemas de gestión de residuos sólidos orgánicos, utilizando la herramienta Integrated Impacts Assessment Tool (IIAT) del Grupo de Liderazgo Climático de Ciudades- C40.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Calcular las emisiones evitadas de GEI provenientes de los diferentes sistemas de aprovechamiento de residuos orgánicos a partir de actividades propuestas en el PGIRS 2020-2027, para la evaluación de la implementación de un modelo de economía circular en el Distrito de Medellín.

2.2 Objetivos específicos

- Contrastar el porcentaje de residuos orgánicos aprovechados con aquellos residuos que son generados en el Distrito de Medellín.
- Evaluar la reducción de emisiones de GEI asociadas a los residuos orgánicos que llegan a relleno, teniendo en cuenta las emisiones causadas por los tratamientos para estos residuos.
- Viabilizar la implementación de alternativas de aprovechamiento y tratamiento de residuos según la estimación del potencial de reducción de GEI.
- Fortalecer acciones puntuales sobre economía circular que apunten al aprovechamiento de residuos orgánicos.

3. Marco teórico

3.1 Metodologías usadas en los Sistemas de Aprovechamiento (SA) del distrito

Siguiendo la línea de gestión, y observando la importancia porcentual del componente orgánico que se dispone en el relleno, se encuentran dos alternativas de aprovechamiento utilizadas en el distrito: el compostaje y las pacas biodigestoras

3.1.1 Compostaje

El compostaje es un proceso de descomposición aeróbica realizado por microorganismos, en el que, bajo condiciones de temperatura y humedad adecuadas, permite transformar la materia orgánica en un material homogéneo y asimilable por las plantas llamado compost (Oficina Regional de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013), que pueda ser empleado en otras actividades y reducir al mismo tiempo la cantidad de residuos orgánicos que se depositan en rellenos sanitarios.

El compostaje se considera una alternativa más sostenible que la disposición final y la incineración para gestionar los desechos de alimentos, (USEPA, 2011) Durante el proceso de compostaje, los materiales orgánicos son descompuestos por microorganismos en condiciones aeróbicas de baja humedad, lo que da como resultado un producto rico en nutrientes que puede usarse como sustituto de la turba, los fertilizantes y el estiércol en actividades agrícolas y hortícolas, como paisajismo, jardinería doméstica, y control de la erosión (Levis et al., 2010;) numerosos estudios han demostrado los beneficios hortícolas del uso de compost como sustituto de la turba en la producción de plantas ornamentales (Russo et al., 2011). Además, se han destacado los beneficios ambientales del uso de compost para mejorar la calidad del suelo, que incluyen: 1) incorporación de materia orgánica, nutrientes y electrolitos al suelo, 2) reducción de la necesidad de fertilizantes, pesticidas y uso de turba, 3) mejoras en la estructura del suelo, densidad y porosidad, lo que aumenta la capacidad de retención de agua y reduce la erosión y la lixiviación de nutrientes, y 4) mejora la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo, reduciendo así el calentamiento global (Martínez-Blanco et al., 2011). Por el contrario, si se realiza una mala ejecución del proceso de producción de compostaje, se pueden tener impactos ambientales negativos, como las emisiones de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y amoníaco (NH₃)

provenientes de bacterias metanogénicas y procesos de desnitrificación, cuando se presentan condiciones anaeróbicas durante el proceso, lo que genera olor y emisiones adicionales de gases de efecto invernadero (Edwards y Williams, 2011).

3.1.2 Paca biodigestora

La paca biodigestora, también conocida como paca digestora Silva, es una tecnología para el manejo integral de los residuos orgánicos, un proceso que permite la degradación biológica de la materia orgánica hasta abono o sustrato, un material orgánico que contiene nutrientes biodisponibles para las plantas y organismos que benefician la calidad del suelo (Ossa et al., 2020). la paca digestora es un bloque de residuos: vegetales y cárnico, crudos y cocidos compactados, máximo de 500 kg en un metro cubico, esta digiere los residuos biodegradables, descontamina por fermentación sólida y opera como un reactor biológico activado por bacterias y hongos recicladores y formadores de suelo orgánico del bosque nativo (Silva Pérez, 2021).

Lo que se busca con las pacas es favorecer la transformación de residuos en presencia mínima de oxígeno, generando subproductos como etanol y ácido orgánicos; esto se logra por medio de la compactación del material, favoreciendo rutas fermentativas para de esta manera tratar los residuos de una forma más salubre (Silva., 2012). La paca es una técnica autónoma, artesanal y económica; puede procesar materia orgánica a la intemperie, sin infraestructura y sin contaminación; permite tratar casi media tonelada de materia orgánica en un metro cúbico, ocupando un área de un metro cuadrado (Rivera R & Ossa C, 2017)

3.2 Transformación de residuos orgánicos y economía circular

El compostaje y los biodigestores son los métodos más utilizados, en los cuales se llevan a cabo procesos de descomposición biológica donde la participación de los microorganismos en el ciclo de los nutrientes es esencial (Keng et al., 2020); y así con el tratamiento o transformación de los residuos orgánicos, se contribuye con la mitigación de los efectos del cambio climático, la reducción de contaminación relacionada con problemas de salud, la conservación de los recursos naturales y el desarrollo social, económico y ambiental (Dhanya et al., 2020).

En ese sentido, es innegable la relación existente entre los dos procesos antes descritos y la economía circular, ya que el cierre de ciclo de los nutrientes (de forma general los residuos orgánicos) se convierte en el inicio de este, al volver a la cadena como sustituyente de fertilizantes o como energía para procesos productivos. Según la fundación Ellen MacArthur, la economía circular está sustentada bajo tres principios: el primero es eliminar los residuos y la contaminación, asumiendo que la economía actual está basada en un proceso lineal pero que a partir del diseño de los productos se puede promover un ciclo que piense en alternativas sostenibles como el que puedan ser reutilizados, reparados y reciclados, el segundo es circular productos y materiales, esto significa mantener los materiales en uso sea como producto o como materia prima, de manera que nada se convierta en un desecho y se conserve el valor de los productos y materiales; y el tercero es regenerar la naturaleza al pasar de una economía lineal a una circular apoyando procesos naturales y dando espacio para que la naturaleza prospere (Ellen MacArthur, 2022).

En Medellín se está realizando la formulación de la Política Pública de Economía Circular a partir del acuerdo 043 de 2021 “Por medio del cual se establecen los lineamientos para la Política Pública de Economía Circular para el Municipio de Medellín” y de acuerdo a lo establecido en la actualización del PGIRS 2015-2027 (Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia, 2020), se establecen una serie de indicadores para evaluar el cumplimiento de las actividades propuestas en el proyecto de aprovechamiento de residuos orgánicos (incluido en el programa de aprovechamiento), de los cuales se escogieron tres según la idoneidad temática de esta propuesta:

3.2.1 Fortalecer el cambio hacia modelo de economía circular

Con relación al cambio climático se pretende reducir las emisiones de GEI asociadas a los residuos orgánicos que llegan a relleno, teniendo en cuenta las emisiones causadas por los tratamientos para estos residuos. Esto se cuantificará por medio de la relación Emisiones CO₂ equivalentes (eq) reducidas mediante el aprovechamiento/ tratamiento de los residuos orgánicos, como lo expresa la ecuación 1.

Ecuación 1: Cálculo del Indicador 1

$$\frac{\text{Emisiones CO}_2 \text{ equivalente reducidas}}{\text{Emisiones CO}_2 \text{ equivalente totales}} \times 100$$

3.2.2 Aumentar el aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en el municipio de Medellín

Son las toneladas de residuos orgánicos efectivamente aprovechadas, este indicador se medirá por medio de la relación porcentaje de residuos orgánicos aprovechados/tratados en el municipio de Medellín, según la ecuación 2:

Ecuación 2: Cálculo del Indicador 2

$$\frac{\text{Toneladas de residuos orgánicos aprovechados y tratados}}{\text{Ton de residuos generados}} \times 100$$

3.2.3 Implementación de alternativas de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos según viabilidad, incluyendo estimación del potencial de reducción de GEI

Son aquellos sitios que permitan el aprovechamiento y/o tratamiento de los residuos orgánicos recolectados, que contribuyan a la reducción de GEI en la ciudad y al cumplimiento de las metas del plan de acción climática. Su cuantificación se realizará mediante la relación # instalaciones de tratamiento de residuos orgánicos implementadas por año / # total de plantas planeadas por año como lo muestra la ecuación 3

Ecuación 3: Cálculo del Indicador 3

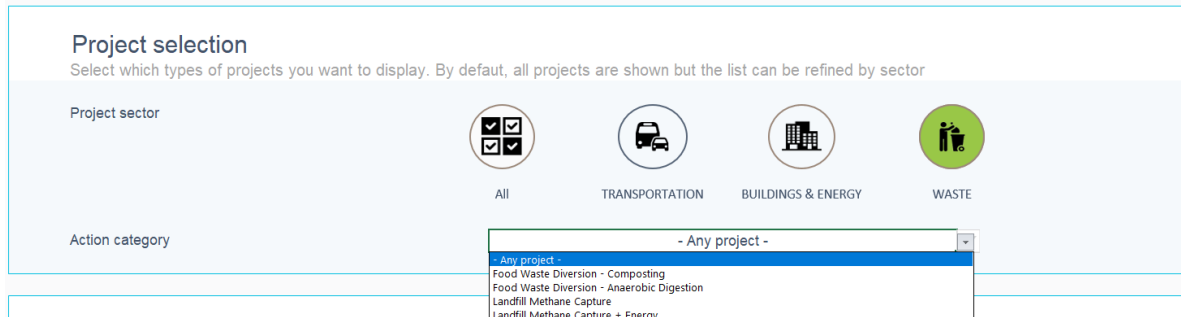
$$\frac{\# \text{ de instalaciones de tratamiento de residuos orgánicos por año}}{\# \text{ total de plantas planeadas por año}} \times 100$$

3.3 Herramienta para el cálculo de emisiones

Así, obteniendo la cantidad de residuos orgánicos recolectados en diferentes sistemas de aprovechamiento de la ciudad, se inició al cálculo de GEI mediante la herramienta Impacts Assessment Tool (IIAT) desarrollada para contabilizar reducciones de emisiones a nivel de proyecto, permitiendo a los usuarios estimar los efectos de las acciones climáticas sobre la reducción de GEI contaminación del, así como los beneficios para la salud relacionados con la calidad del aire y la movilidad activa.

Este instrumento, desarrollado a partir de macros en Excel, es un mecanismo de contabilidad a nivel de proyecto que permite a los usuarios estimar los efectos de la acción climática en una amplia variedad de impactos; este permite crear el proyecto por sector y categoría de acción como se observa en la Figura 1.

Figura 1: Definición del tipo de proyecto a realizar y la categoría de acción

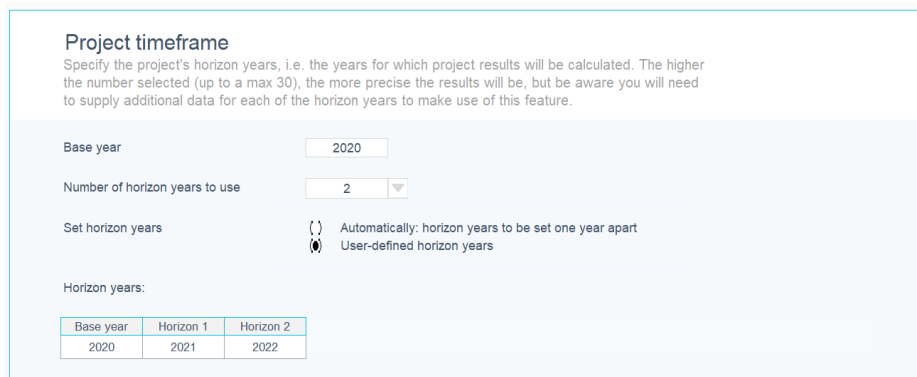


Nota: Pantallazo tomado al aplicativo IAT

Se elige qué impactos se desea evaluar: emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de contaminantes del aire, impactos en la salud de la calidad del aire y creación de empleo; siendo la primera de las opciones la de interés.

La herramienta permite contemplar varios horizontes temporales para el desarrollo del proyecto, en este caso se evaluó a nivel temporal el impacto que se tiene por el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante compostaje y digestión anaerobia en forma de pacas para los dos escenarios.

Figura 2: Definición temporal del proyecto



Nota: Pantallazo tomado al aplicativo IAT

Es muy importante para la ejecución del proyecto conocer la cantidad de residuos orgánicos que serán tratados en los diferentes sistemas.

La sección de metodología presenta las ecuaciones y parámetros utilizados para los cálculos en la herramienta. Esta página muestra las ecuaciones primarias, mostrando cómo se calculan las emisiones en la línea de base, y los escenarios de políticas, así como las ecuaciones secundarias, mostrando el cálculo intermedio resultante de los datos proporcionados por los usuarios.

La herramienta IIAT utiliza la metodología del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del 2006 (IPPC), basándose en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4: Ecuaciones primarias

$$a) \mathbf{Em}_{BL,y} = \sum_{vtype,ftype} EFveh_{vtype,ftype,y} \times Nveh_{vtype,ftype,y} \times DTveh_{vtype,y}$$

$$b) \mathbf{Em}_{PJ,y} = \sum_{vtype,ftype} EFbus_{btype,ftype,y} \times Nbus_{vtype,ftype,y} \times DTbus_{vbftype,y}$$

Donde:

BL: Escenario de referencia. Término de tipo subíndice

PJ: Escenario del proyecto. Término de tipo subíndice

Y: Año de los cálculos. Término de tipo subíndice

Fype: Tipo de combustible. Término de tipo subíndice

Vtype: Tipo de vehículos. Término de tipo subíndice

Btype: Tipo de autobús. Término de tipo subíndice

Em_{BL}: Emisiones totales en el año y para el escenario de referencia, en tonCO₂eq. Término de tipo variable

Em_{PJ}: Emisiones totales en el año y para el escenario del proyecto, en tonCO₂eq. Término de tipo variable

EFveh_{vtype,ftype,y}: Factor de emisión para la categoría de vehículo vtype en el año y, en tonCO₂eq/ pkm. Término de tipo variable por defecto

$N_{veh_{vtype,ftype,y}}$: Numero de pasajeros del proyecto de explotación por categoría de vehículo $vtype$ en el año y , en km. Término de tipo variable

$DT_{veh_{vtype,y}}$: Distancia media anual recorrida por el tipo de vehículo $vtype$ en el año, en km. Término de tipo entrada del usuario

$EF_{bus_{btype,ftype,y}}$: Factor de emisión para la categoría de autobús $vtype$, combustible $ftype$ en el año y por km, en tonCO₂eq/ pkm. Término de tipo variable por defecto

$N_{bus_{vtype,ftype,y}}$: Numero de vehículos del proyecto en operación en la categoría $vtype$ en el año y . Término de tipo entrada del usuario

$DT_{bus_{vbftype,y}}$: Distancia media anual recorrida por el tipo de autobús $vtype$ en el año y , en km, Término de tipo entrada del usuario

Ecuaciones secundarias: Las ecuaciones secundarias que describe la herramienta no son aplicadas a este cálculo ya que es para transporte público o privado, y el único medio que se utiliza para el desarrollo de la actividad de tratamiento es incluido en las anteriores ecuaciones primarias que incluye el cálculo para los vehículos recolectores.

La herramienta está pensada para ser utilizada tanto por usuarios expertos como no expertos. El modo básico permite a los usuarios obtener estimaciones rápidas utilizando valores predeterminados e información mínima del proyecto. El modo avanzado proporciona a los usuarios estimaciones muy detalladas y permite modificar todos los parámetros. Para que el modo avanzado proporcione la máxima precisión, fue necesario recopilar amplia información sobre el contexto del proyecto, dicha información fue suministrada por el comité técnico para la evaluación de impactos ambientales de la Secretaría de Medio Ambiente, presentada así:

Horizontes temporales: Para el proyecto a pequeña escala, se han considerado 3 horizontes temporales con un año base en 2020 previo a la implementación del proyecto 2021,2022

Potencial de evapotranspiración: El potencial de evapotranspiración (mm/año) para la ciudad de Medellín se ha estimado mediante el método Thornthwaite. Para ello, se ha considerado

una temperatura media anual de 23,42°C y los datos de temperaturas medias mensuales en Medellín obtenidos de (IDEAM, 2019)

Emisiones energéticas del proceso mecánico de compostaje de residuos: La herramienta IMPACTS considera también las emisiones de GEI generadas del proceso de compostaje, las cuales se generan por el uso de electricidad en iluminación y el uso de combustibles fósiles para el funcionamiento de la maquinaria utilizada para el volteo de las pilas. La herramienta requiere para ello el dato de factor de emisión por consumo de combustibles fósiles por tonelada de residuos tratado (tonCO₂eq/ton residuo) y la eficiencia del consumo eléctrico por tonelada de residuos tratado (kWh/t residuo). Ambas variables se han tomado de datos por defecto disponibles en las Data Collection Sheet que han sido obtenidos de las metodologías CDM para procesos de compostaje (UNFCCC). Siendo el FE del uso de combustible fósil de 0,0207 tonCO₂eq/ton residuo compostado; y la eficiencia eléctrica de 10 kWh/t residuo compostado.

Emisiones del tratamiento biológico de los residuos orgánicos (compostaje): Para este proyecto se reportaron valores de los factores de emisión de CH₄ y N₂O del compostaje de 9,86 kg CO₂eq/ton residuo y 5,5 kg CO₂eq/ton residuo entregados por la ciudad en la Data Collection Sheet. Estos FE son inferiores a los FE por defecto establecidos en las Directrices IPCC, aun así, se encuentran dentro del rango propuesto en dichas directrices.

La herramienta IMPACTS requiere la introducción de estos FE en las unidades de t GEI/t residuos compostados, por lo que es necesario realizar un cambio de unidades empleando los PCG del Quinto Informe de Seguimiento del (IPCC,22014):

Ecuación 5: Cálculo de los factores de emisión para el a) Metano y b) Óxido Nitroso

$$\text{a) } FE_{CH_4} = \frac{9,86 \frac{kg \text{ CO}_2eq}{ton \text{ de residuo}}}{28 * 1000} = 0,000352$$

$$\text{b) } FE_{N_2O} = \frac{5,5 \frac{kg \text{ CO}_2eq}{ton \text{ de residuo}}}{265 * 1000} = 0,0000208$$

Factor de emisión del CNG empleado por los camiones recolectores: La eficiencia de los camiones recolectores de residuos orgánicos se ha obtenido del Inventario Municipal de Medellín de 2015 recogido en la herramienta CIRIS (S. d. M. A. d. Medellín, 2015). Según la información reportada en el Inventario Municipal, el consumo de CNG en la movilidad tiene un factor de emisión (FE) de 55,5 CO₂eq/TJ para el CO₂, 0,028 CO₂eq/TJ para el CH₄ y 0,795 tCO₂e/TJ para el N₂O. Considerando los siguientes factores de conversión para el combustible CNG en Medellín, los cuales también han sido obtenidos del Inventario Municipal: 10,637 kWh/m³ y 0,0000382 TJ/m³. Se obtiene que el FE del CNG en movilidad es de 0,000202269 tCO₂e/kWh.

Eficiencia de los camiones recolectores: La eficiencia de los camiones recolectores que operan a CNG ha sido facilitada por EMVARIAS a través de un correo electrónico. En dicho correo EMVARIAS reporta eficiencias de 1,32 km/m³ de residuos para los vehículos a CNG. La herramienta, sin embargo, requiere la introducción de este valor en las unidades de kWh/km. Para ello, se emplea la siguiente ecuación y el factor de conversión de 10,637 kWh/m³.

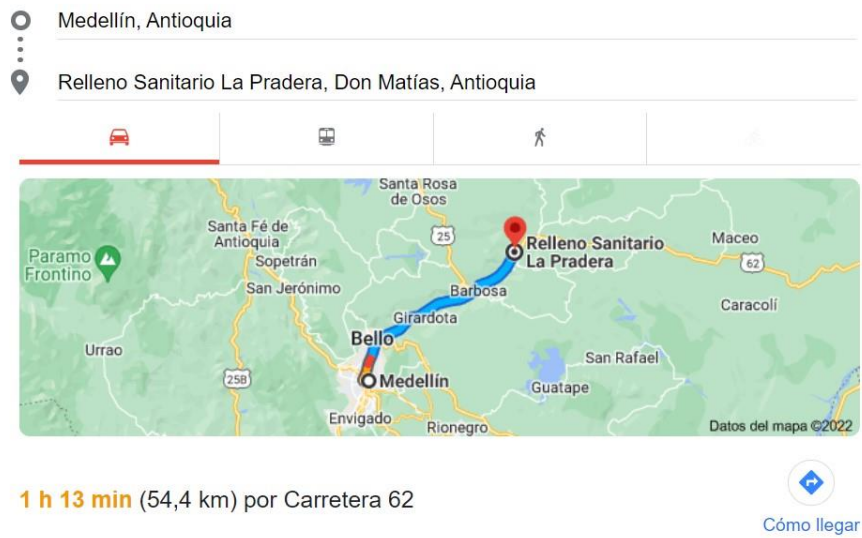
Ecuación 6: Eficiencia de los camiones recolectores

$$Eficiencia: \frac{1}{1,32 \frac{km}{m^3}} * 10,637 \frac{kWh}{m^3} = 8,05833 \frac{kWh}{km}$$

Residuos compostados y tratados: Es necesario conocer la cantidad de residuos orgánicos que son tratados y aprovechados en los sistemas de aprovechamiento.

Distancia media recorrida por los camiones recolectores: La distancia media recorrida por los camiones recolectores en el escenario base se ha estimado en función de la distancia promedio de Medellín al Relleno Sanitario la Pradera, de 54,4 Kms

Figura 3: Distancia entre el distrito de Medellín y el Relleno Sanitario la Pradera



Nota: Tomado de Google Maps

4. Metodología

Para llevar a cabo este proyecto se dividió en cuatro etapas donde se comenzará por la recopilación de los datos necesarios, para luego pasar a depurar la información obtenida, a continuación se harán los cálculos de emisiones, y así en la etapa final generar análisis y conclusiones pertinentes; estos pasos permitirán desarrollar de forma más práctica los pasos para alcanzar los objetivos propuestos. A continuación, se presentan cada una de ellas:

4.1 Etapa 1: Recolección de información

En esta fase del proyecto se recopiló la información necesaria para realizar el cálculo de emisiones GEI, recurriendo a bases de datos proporcionadas por autoridades ambientales como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá- AMVA y la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia – CORANTIOQUIA de quienes se obtuvieron diferentes características de sistemas de aprovechamiento de residuos orgánicos presentes en el distrito de Medellín.

También se utilizó la base de datos que maneja la Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín- SMA, cifras e inventarios que aportan el Plan de Acción Climática Medellín 2020-2050, además, de los Inventarios nacionales de aprovechamiento de residuos orgánicos, entre otros;

4.2 Etapa 2: Depuración de datos

Con la información recopilada se procedió a depurar los datos y cifras que son más significativas, encontrando datos de la distribución territorial y sectorial de los sistemas de aprovechamiento en el Distrito de Medellín, así como características más relevantes como tamaño y tipo de sistema

4.3 Etapa 3: Cálculo de emisiones

Teniendo los datos depurados, se procederá a realizar los cálculos de Emisiones GEI usando la herramienta IIAT, analizando dos escenarios:

- **Escenario 1 (E1) “No aprovechamiento”**

Es la simulación del ambiente donde no se realiza ningún tipo de aprovechamiento, y se dispone todos los residuos en el relleno sanitario

- **Escenario 2 (E2) “Si aprovechamiento”**

En este caso se realizará el análisis del entorno en el que sí se realiza gestión de residuos orgánicos mediante diferentes sistemas de aprovechamiento

Una vez planteadas las hipótesis empleadas para la estimación de las reducciones de las emisiones, se describen los resultados obtenidos. Para ello se ha analizado con la herramienta de IIAT la reducción de emisiones de GEI derivada de la implementación de los dos escenarios planteados para el tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje dentro de la ciudad de Medellín.

De acuerdo con la metodología, la reducción de emisiones se debe a la disminución de emisiones de metano por la reducción de residuos orgánicos que son depositados en el relleno sanitario de La Pradera. Por otra parte, se generarán emisiones de GEI debidas al tratamiento mediante compostaje de la fracción orgánica de los residuos, las cuales son inferiores a las emisiones de GEI generadas por los mismos si estos fuesen depositados en el mencionado relleno sanitario.

A través de la herramienta, se analizará la reducción de emisiones de GEI derivada de la implementación de sistemas de compostaje y pacas biodigestoras de residuos orgánicos en el Distrito de Medellín que repercutirá en el descenso de las emisiones de GEI del sector de los residuos de la ciudad.

Por otro lado, para el cálculo de los indicadores es necesario tener en cuenta ciertos aspectos en el proceso de estimación, para esto se recurrió a diferentes datos proporcionados por el equipo técnico de la SMA:

Para el primer indicador “*Fortalecer el cambio hacia modelo de economía circular*”, es necesario conocer las emisiones totales del sector residuos, específicamente de la parte orgánica,

para lo que se recurrió al Plan de Acción Climática del distrito, donde se señala que 744.959 tonCO₂eq son generadas por los residuos sólidos,

4.4 Etapa 4: Análisis de resultados

En esta fase se realizará el análisis de los factores obtenidos, teniendo en cuenta qué tan viable es la implementación de estos sistemas de tratamiento (E1) de residuos mediante el resultado del potencial de reducción de GEI en contraste con el E2, y según esto afirmar o no que estas acciones pueden fortalecer la transición hacia el modelo de economía circular que se quiere implementar en el Distrito de Medellín; además se ubican los diferentes SA en un mapa de Medellín utilizando el software ArcGis.

5. Resultados y Análisis

5.1 Depuración de los datos

A continuación, se de manera mas explicita se presenta la depuración de las principales características de los sistemas de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos presentes en el Distrito de Medellín

Tabla 1: Distribución territorial de los sistemas de aprovechamiento en el Distrito de Medellín

Distrito de Medellín		
Ubicación	Residuos aprovechados (ton/m)	Numero de sistemas
<i>Corregimientos</i>	565	6
<i>Urbano</i>	652	48
<i>Total</i>	1.216	54
Tipo de residuos orgánicos		
<i>Residuos de comida</i>	1035	ton/m
<i>Residuos de jardín</i>	182	ton/m

Nota: Adaptado de (AMVA, CORANTIOQUIA, 2022)

Tabla 2: Distribución sectorial de los sistemas de aprovechamiento en el distrito de Medellín

Distribución sectorial de los Sistemas de Aprovechamiento	
Sector	Número de sistemas
<i>Barrial</i>	17
<i>Hogar</i>	4
<i>Institución educativa</i>	12
<i>Centro recreativo</i>	1
<i>Centros productivos</i>	6
<i>Unidades residenciales</i>	3
<i>Municipal</i>	7
<i>UTM</i>	4

Nota: Adaptado de (AMVA, CORANTIOQUIA, 2022)

Tabla 3: Características de los sistemas de aprovechamiento en el distrito de Medellín

Tipo y tamaño del sistema				
Tamaño \ Tipo	Grande (mayor a 1,2 ton)	Mediana (entre 0,3 y 1,199 ton)	Pequeña (menor a 0,3 ton)	Total
<i>Nuevo</i>	4	10	8	22
<i>Existente</i>	8	5	17	30
			<i>Total</i>	52

Nota: Adaptado de (AMVA, CORANTIOQUIA, 2022)

De acuerdo con la Tabla 4, el 62,42% pertenecen a la generación de residuos sólidos orgánicos de la ciudad. Con estos datos y con los arrojados por la herramienta IIAT, se estimará fácilmente este indicador uno.

Tabla 4: Compilado caracterización de los residuos en el Relleno Sanitario la Pradera

Material	2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		Promedio	
	Peso kg	%	Peso kg	%	Peso kg	%	Peso kg	%	Peso kg	%	Peso kg	%	Peso Kg	%	Peso Kg	%	Peso kg	%
ORGÁNICO	81,59	58%	96,22	59%	117,11	63%	113,64	61%	105,70	65%	107,87	67%	104,14	64%	93,52	63%	104,98	62%
PLÁSTICO	18,81	13%	24,50	15%	26,82	14%	26,46	14%	22,86	14%	22,58	14%	22,35	14%	21,20	14%	23,09	14%
PAPEL	12,15	9%	14,80	9%	13,31	7%	14,40	8%	11,11	7%	10,37	6%	9,54	6%	7,92	5%	10,67	6%
TELA	13,01	9%	14,05	9%	12,68	7%	13,76	7%	11,51	7%	11,37	7%	10,90	7%	8,89	6%	11,29	7%
MADERA	7,79	6%	8,15	5%	7,70	4%	7,57	4%	4,72	3%	3,30	2%	5,64	3%	5,07	3%	5,26	3%
CAUCHO	4,93	4%	4,65	3%	7,07	4%	8,44	5%	7,05	4%	6,12	4%	6,64	4%	5,45	4%	6,74	4%
LATA	1,31	1%	0,63	0%	0,29	0%	1,69	1%	0,03	0%	0,02	0%	1,40	1%	3,81	3%	1,39	1%
VIDRIO	0,51	0%	0,15	0%	0,06	0%	1,48	1%	0,16	0%	0,00	0%	1,34	1%	3,23	2%	1,24	1%
TOTAL	140,11	1,00	163,14	1,00	185,04	1,00	187,44	1,00	163,14	1,00	161,63	1,00	161,96	1,00	149,10	1,00	164,66	1,00

Fuente: Consolidado Caracterización 2015-2022, EMVARIAS a Equipo de Residuos Sólidos de la SMA

Así mismo el valor para el total de residuos orgánicos aprovechados en el Distrito es de 58.576 ton/año, esto tomado de informe técnico de cálculo de aprovechamiento para 2021 del Equipo de Residuos Solidos

5.1 Cálculo de emisiones

Teniendo los datos de la Tabla 1, se realizó la hipótesis para el E1 de que el aprovechamiento mínimo para 2022 será igual al conseguido el año anterior, y para el escenario E2, donde no habría aprovechamiento, será el año base de 2020, se llenaron los campos solicitados por el aplicativo de forma general así:

Figura 4: Pantallazo del IIAT para las diferentes cantidades de residuos generadas en los años de estudio

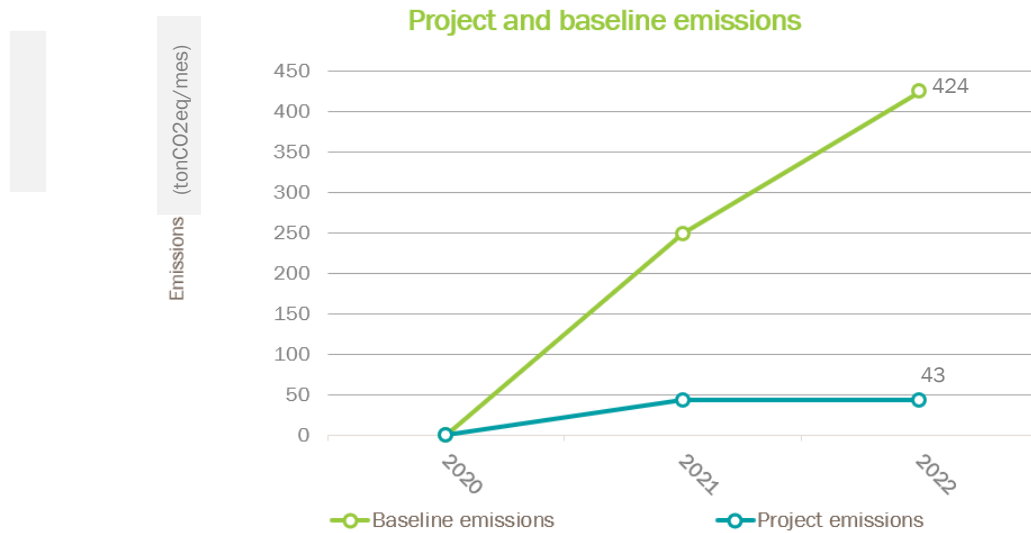
Waste diverted to composting
The number of households and the type lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit aenean euismod bibendum

Amount of waste diverted to composting Define values for all horizons - Please select source -

	2020	2021	2022
Food waste (t/year)	0	1.035	1.035
Yard waste (t/year)	0	182	182

Con esta definición del horizonte del proyecto y las respectivas cantidades de los residuos sólidos orgánicos generados, aprovechados y tratados, De esta manera la herramienta presenta de forma compacta los resultados obtenidos. A continuación, se desglosará cada uno de ellos

Gráfica 1: Comparación de año base y el proyecto de aprovechamiento

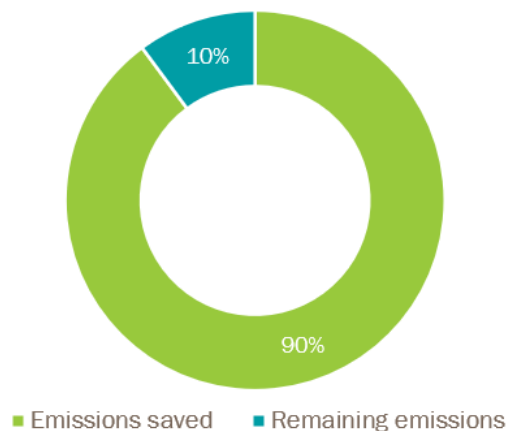


En la Grafica 1, la línea verde indica las emisiones base, en esta no se realiza ningún tipo de aprovechamiento de los residuos (E2), y la línea azul muestra las emisiones que se generan con el proyecto (E1), es decir, si no se aprovechan los residuos orgánicos en estos sistemas las emisiones de GEI a la atmosfera serían de 424 tonCO₂eq/mes en el último año, pero con el tratamiento solo se emitirían 43 tonCO₂eq/mes en el último año, con una disminución de 381 tonCO₂eq/mes en el último año, es decir, una significativa reducción de gases de efecto invernadero que no estarían emitiendo; esto lleva a pensar que si se potenciaran estos sistemas, se implementararan otros, y se fortaleciera la sensibilización educativa a la ciudadanía acerca de la adecuada separación en la fuente y, el aprovechamiento y/o tratamiento de los compuestos orgánicos, las cifras de emisiones se reducirían porcentualmente apoyando la premisa de que el tratamiento de residuos orgánicos mediante compostaje u otras metodologías tiene menos impacto ambiental, que otros escenarios de eliminación de desechos orgánicos, como los vertederos y la

incineración (Andersen et al., 2012) ,además, se puede observar en la Gráfica 2, donde se evalúa el impacto del aprovechamiento en el último año de tratamiento de los residuos, encontrando que un 90% de emisiones a la atmosfera de GEI son retenidas por la gestión de estos desechos y solo el 10% quedan como emisiones remanentes ya sea por los lixiviados que se generan en las pacas biodigestoras o en el compostaje por la degradación de la materia orgánica y al uso de electricidad y combustibles en las operaciones de gestión de residuos (Sanchez et al., 2015), pero si estos sistemas son bien operados controlando parámetros fisicoquímicos y microbiológico en las pacas, estas emisiones pueden reducirse, es decir, ser menos del 10%.

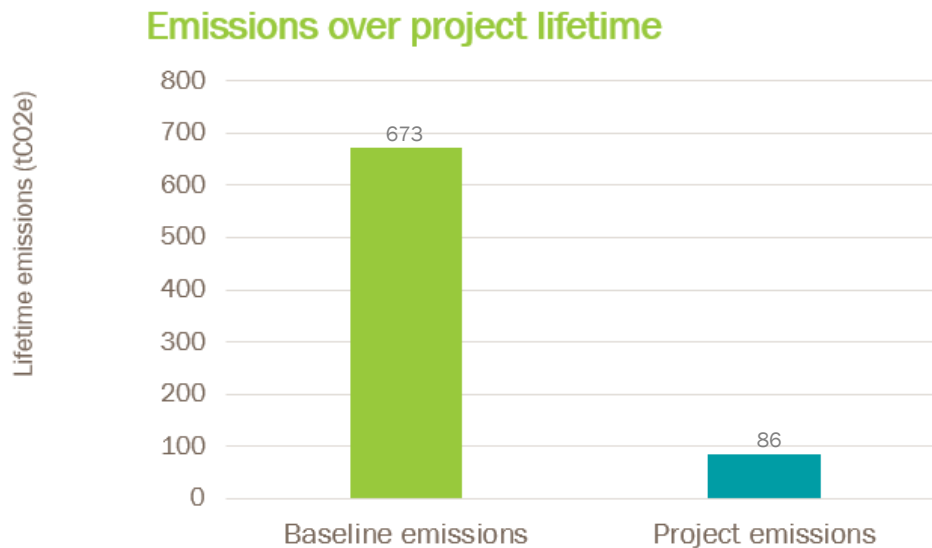
Gráfica 2: Emisiones de GEI en el último año del proyecto

GHG emissions in final project year



Según la Gráfica 3, donde se tiene la comparativa de los Escenarios 1 y 2, queda más que evidenciado que es viable la implementación de los sistemas de aprovechamiento en la ciudad, poniendo en paralelo las proyecciones que presenta la IIAT, donde la barra verde del E2 durante el desarrollo temporal del proyecto generará 673 tonCO₂eq, pero implementando los sistemas de aprovechamiento se contaría con 89 tonCO₂eq de emisiones en los años de estudio, apoyando la idea de que es totalmente viable la implementación de estas metodologías en la ciudad.

Gráfica:3 Emisiones a lo largo del proyecto



5.2 Cálculo de indicadores de aprovechamiento



Con todos estos hallazgos se procedió a realizar el cálculo de los indicadores de aprovechamiento mediante una hoja de Excel, con los siguientes datos

Tabla 5: Datos necesarios para el cálculo de indicadores

DATOS	Cantidad	Unidad
<i>Emisiones reducidas</i>	381	tonCO2 eq
<i>Emisiones totales por residuos sólidos</i>	744.959	tonCO2 eq
<i>Emisiones totales por residuos orgánicos</i>	465.301	tonCO2 eq
<i>RO aprovechados y tratados en SA</i>	1.216	ton
<i>RO aprovechados en el distrito</i>	58.576	ton
<i>Residuos generados</i>	936.308	ton
<i>Instalaciones creadas por año</i>	54	#
<i>Instalaciones proyectadas para 2022</i>	0	#

Las emisiones reducidas fueron tomadas del resultado de emisiones de la IIAT, las emisiones totales por residuos orgánicos se definieron a partir del 62,42% de las emitidas por los residuos sólido en general, los RO aprovechados y tratados en SA se tomó de la Tabla 1 al igual que las instalaciones creadas por año, también la cantidad de residuos generados en la ciudad fue tomada del documento técnico del Equipo de Residuos Sólidos de la SMA.

Tabla 6: Resultados de indicadores de aprovechamiento con los sistemas de aprovechamiento

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Facultad de Ingeniería		PGIRS modulo 7. Aprovechamiento		 Alcaldía de Medellín Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación	
Pag 207-209	Indicador	Formula	Resultado		
Tabla 33: Indicadores para el programa de aprovechamiento de residuos orgánicos	1. Fortalecer el cambio hacia modelo de economía circular	$\frac{\text{Emisiones } CO_2 \text{ equivalente reducidas}}{\text{Emisiones } CO_2 \text{ equivalente totales}} \times 100$	0,08	%	
	2. Aumentar el aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en el municipio de Medellín	$\frac{\text{Toneladas de residuos orgánicos aprovechados y tratados}}{\text{Ton de residuos generados}} \times 100$	0,13	%	
	3. Implementación de alternativas de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos según viabilidad, incluyendo estimación del potencial de reducción de GEI	$\frac{\# \text{ de instalaciones de tratamiento de residuos orgánicos por año}}{\# \text{ total de plantas planeadas por año}} \times 100$	100	%	

Nota: Adaptación de la tabla de Indicadores para el programa de aprovechamiento de residuos orgánicos del PGIRS

Para el *Indicador 1* se tomó el valor de las emisiones reducidas y de las emisiones totales por residuos orgánicos, encontrando un valor de 0,08% y cotejando este valor con la meta propuesta en el PGIRS para este índice, no se tiene una meta ni para 2021 ni para 2022, por lo que en términos de trabajo es un gran avance. Por esto es necesario que mediante el acompañamiento y seguimiento de estos SA esta cifra obtenida crezca y sirva como insumo para la meta del 4% para 2023.

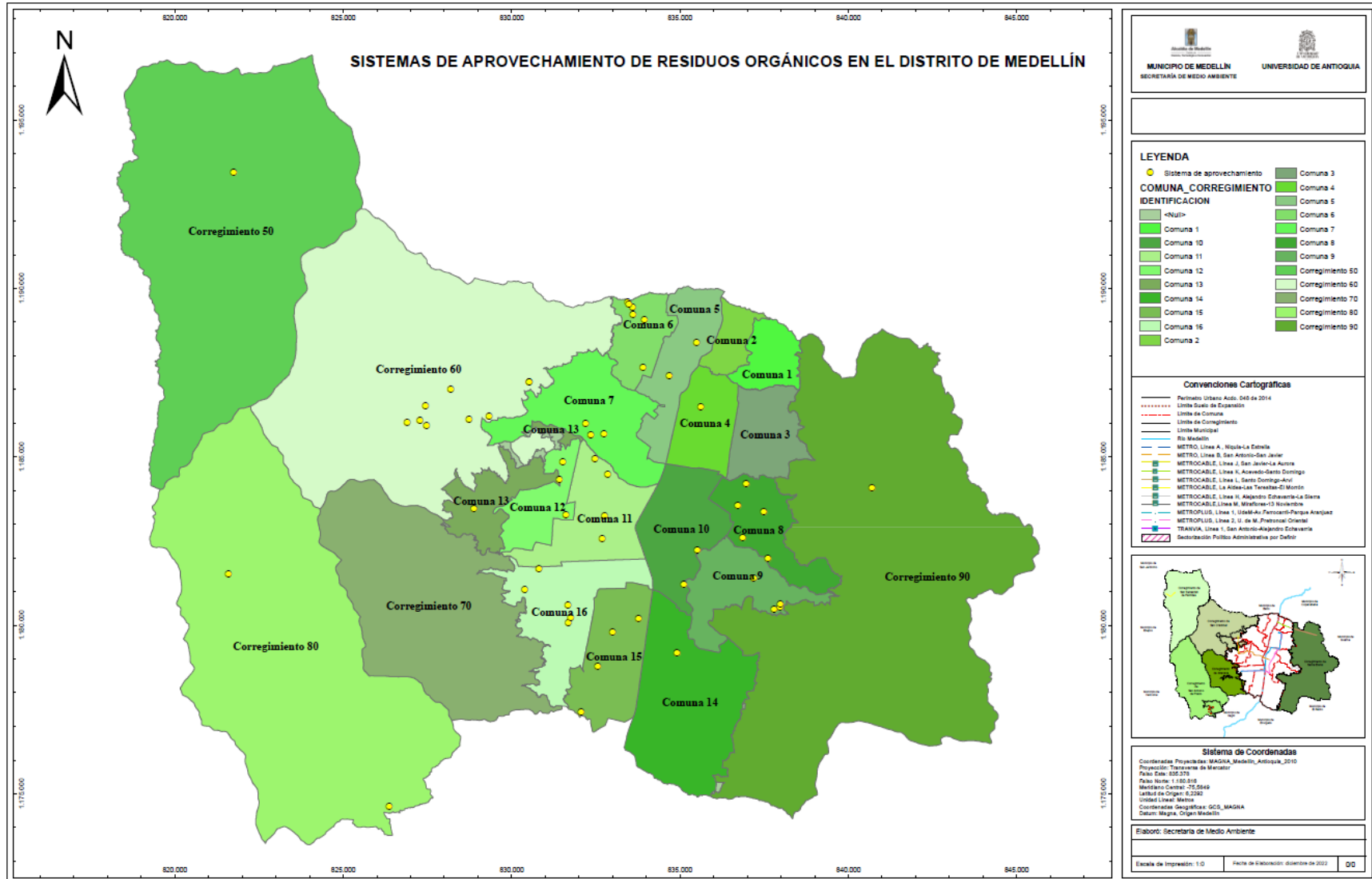
Continuando con el *Indicador 2*, se cuantificó utilizando los RO aprovechados y tratados en SA y la cantidad de Residuos generados en la ciudad, obteniendo un 0,13% y en contraste con la meta propuesta en el PGIRS del 10%, puede parecer distante, pero hay que aclarar que esto es solo de los sistemas de aprovechamiento estudiados; por esto también se quiso evaluar el indicador con la cifra general de residuos aprovechados en todo el distrito, incluyendo los SA, arrojando un valor para el indicador de 6,3%, siendo un valor prometedor para el cumplimiento de la meta.

El *Indicador 3*, se midió teniendo en cuenta el número de instalaciones creadas en el año y aquellas que se proyectaron; como para 2021 y para 2022 no se tenía una meta establecida, se concretó que para este la medida sería del 100%, ya que esto indica un interés por avanzar y gestionar de manera eficiente los residuos orgánicos de tal forma que se mitiguen los efectos de los gases de efecto invernadero en la atmosfera mediante el tratamiento de estos.

Para alimentar los hallazgos, se hace una observación sobre las características de generales de los SA. Según la Tabla 1 cerca del 90% de estos se encuentran en la parte urbana de la ciudad, y el restante en los corregimientos, esto se puede argumentar frente al hecho de que en las zonas rurales estos residuos son utilizados en otros procesos que se llevan a cabo en las fincas, como alimento para cerdos, abono para las plantas, entre otros; también con este elevado porcentaje y según la Tabla 2, se denota que el interés por la gestión de los residuos, el cuidado del medio ambiente y un pensamiento indirecto hacia la economía circular, viene en aumento en la conciencia colectiva del ciudadano ya que en los barrios están implementando estas alternativas de aprovechamiento y también se destaca que desde los colegios se está enseñando la cultura de la sostenibilidad y el cuidado del entorno al utilizar estas metodologías, sin embargo cabe resaltar que no hay presencia de este tipo de iniciativas por parte de la industria.

Por otro lado, según la Tabla 3, cerca del 50% de los sistemas son pequeños, y el 22% corresponde a sistemas grandes, por lo que sería bueno entrar a evaluar cuales de estos se pueden potenciar y mediante acompañamiento y seguimiento fortalecer la gestión de los residuos orgánicos mediante sistemas de aprovechamiento.

Mapa 1: Ubicación de los diferentes Sistemas de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en el distrito de Medellín



Nota: Elaboración propia

6. Conclusiones

Si bien la gestión de los residuos orgánicos mediante estas técnicas es loable y contribuyen a mitigar las emisiones contaminantes a la atmósfera, queda un desafío de cara a la cantidad de residuos sólidos que van a disposición final, del cual un gran porcentaje corresponden a la fracción orgánica con lo que se podría dar un mejor manejo y aprovechamiento de estos si hubiera una adecuada separación y gestión en la fuente.

Aunque son significativas las reducciones de Gases de Efecto Invernadero por parte de los sistemas de aprovechamiento estudiados, es importante potenciar, actualizar y mejorar el rendimiento de estas metodologías, para minimizar aún más las emisiones remanentes de los procesos.

Se destaca la actividad de gestión de residuos sólidos que se está realizando por parte de la implementación de las 54 alternativas de aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos en el Distrito, contribuyendo con las metas propuestas en el PGIRS y con el sentido ambiental de convertir el distrito de Medellín en una *Ecociudad*.

Por tanto es totalmente viable la gestión y el aprovechamiento de los residuos orgánicos mediante estos sistemas de aprovechamiento y su rol en la minimización de gases de efecto invernadero emitida en el relleno sanitario, para lo que es importante seguir con su acompañamiento, que estos no desfallezcan en su gestión, y mediante la sensibilización a la ciudadanía y con el apoyo del Estado se puedan potenciar y mantener el tiempo, para que sigan contribuyendo a la mitigación del cambio climático, contribuyendo a la transición hacia el modelo económico circular mediante el aprovechamiento económico de los productos derivados de esta actividad.

7. Referencias

Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia. (2020a). Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS de Medellín, componente de generación de residuos sólidos. (Página 49)

Alcaldía de Medellín & Universidad de Antioquia. (2020b). Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS de Medellín, componente de Aprovechamiento. (Pag 207-209)

Alcaldía de Medellín (2019). Caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial y no residencial del área urbana y rural de Medellín y sus cinco corregimientos. contrato No. 4600077223 de 2018

Alcaldía de Medellín. (2020). Plan de Acción Climática Medellín, 2020-2025

C40 Cities. (2022). About C40. <https://www.c40.org/about-c40/>

C40 Cities. (2022b). Waste Management. <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/waste-management/>

Andersen, J. K., Boldrin, A., Christensen, T. H., & Scheutz, C. (2012). Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: An environmental assessment using life cycle assessment-modelling. *Waste management*, 32(1), 31-40.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corporación Autónoma Regional del Centro de

Antioquia (2022). Aunar esfuerzos para continuar fortaleciendo la gestión integral de

residuos sólidos, para los diez municipios del Valle De Aburrá, San Jerónimo, Sopetrán y Santa Fé De Antioquia. [Diapositivas; Digital].

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2015), La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible, Síntesis 2015, Santiago de Chile.

Dhanya, B. S., Mishra, A., Chandel, A. K., & Verma, M. L. (2020). Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Science of the Total Environment*, 723, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>

Edwards, D., & Williams, C. (2011). Method for Estimating Greenhouse Gas Emission Reductions from Compost from Commercial Organic Waste.

Ellen Macarthur Foundation (2022). What is a circular economy? <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

IDEAM, «Indicadores Climáticos,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/clima>.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERIA, FMAM. Bogotá, Colombia.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2014).«Fifth Assessment Report (AR5),» 2014.

Keng, Z. X., Chong, S., Ng, C. G., Ridzuan, N. I., Hanson, S., Pan, G. T., Lam, H. L. (2020). Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121220>

Levis, J. W., Barlaz, M. A., Themelis, N. J., & Ulloa, P. (2010). Assessment of the state of food waste treatment in the United States and Canada. *Waste management*, 30(8-9), 1486-1494.

Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A., & Rieradevall, J. (2011). Assessment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizers, from an agricultural and environmental standpoint. *Journal of cleaner production*, 19(9-10), 985-997.

Naciones Unidas. (2022). Desafíos Globales: Población. <https://www.un.org/es/global-issues/population>

Oficina Regional de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, para América Latina y El Caribe (FAO). (2013). *Manual De Compostaje Del Agricultor: Experiencias en América Latina*. FAO.

Okafor, N. (2011). *Environmental microbiology of aquatic and waste systems*. Springer Science & Business Media.

Organización Mundial de la Salud. (2021). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Who.int. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Ossa-Carrasquilla, L. C., Correa-Ochoa, M. A., & Múnica-Porras, L. M. (2020). La paca biodigestora como estrategia de tratamiento de residuos orgánicos: una revisión bibliográfica. *Producción+ Limpia*, 15(2), 71-91.

Rivera, Ramón, & Laura Catalina Ossa. (2017). Experiencia Didáctica Con Las Pacas Biodigestoras En Entornos Educativos Del Estado de México. *Scielo* 69(2395–9177): 17. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2395-91772017000100085&script=sci_arttext.

Russo, G., De Lucia, B., Vecchiotti, L., Rea, E., & Leone, A. (2011). Environmental and agronomical analysis of different compost-based peat-free substrates in potted rosemary. In *International Symposium on Growing Media and Composting* 891 (pp. 265-272).

Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., ... & Mondini, C. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental chemistry letters*, 13(3), 223-238.

Secretaria de Medio Ambiente de Medellín. (2015). *Inventario Municipal de Emisiones de GEI de Medellín*.

Silva Pérez. (2021). *Tecnologías ecológicas en la paca digestora de desperdicios orgánicos, generadoras de: Ambiente sano, trabajo digno, bienestar comunal*. [PDF]. En *Gestión integral de los residuos orgánicos hacia la sostenibilidad* (1.a ed.). Laura Catalina Ossa Carrasquilla.

Siti Nadzirah Othman, Zainura Zainon Noor, Ahmad Halilu Abba, Rafiu O. Yusuf, Mohd. Ariffin Abu Hassan, (2013) Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries, *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.043>.

UNFCCC. Clean development mechanism, Project and leakage emissions from composting. version 02.0.

USEPA, 2011. Basic information about food waste.

<http://www.epa.gov/osw/conservation/materials/organics/food/fd-basic.htm>

Vera, M. F., & Jaramillo, G. A. (2019). Alternativa de desarrollo sostenible para el municipio de Segovia a partir del aprovechamiento de residuos orgánicos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>