

**PROPUESTA PARA ELABORACIÓN DE ABONO A PARTIR DE COMPOSTAJE TENIENDO
EN CUENTA LA INCLUSIÓN DE UNA MEZCLA DE MICROORGANISMOS EN EL
PROCESO.**

**JEAN PIERRE MARTINEZ URUEÑA
HANNA SUAREZ PARRA**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
ADRIANA SUESCA DIAZ
MSC INGENIERA QUÍMICA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Adriana Suesca Diaz

Diana Milena Morales Fonseca

Ivonne Angulo de Castro

Bogotá D.C. Agosto de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNVIERSIDAD

Presidente de la Universidad y Reactor del Claustro

Dr. Mario Posada García – Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis James García – Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macias Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Programa Ingeniería Química

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a Dios principalmente por ser mi guía, darme salud y disciplina para alcanzar este logro tan importante, a mis padres Silvio y Luz Dary por su dedicación en estos años de formación profesional, por apoyarme incondicionalmente, darme mi educación y ser mi gran motivación. A mi hermana Silvia por acompañarme en cada etapa de mi vida, a mi hermano James que aunque ya no se encuentre a mi lado sigue siendo mi fuerza para salir adelante y sé que está muy orgulloso de mi desde el cielo, a mi perro Percy por acompañarme en mis clases virtuales y que al estar a mi lado me ha dado mucha fuerza para seguir adelante, y finalmente a mi compañera de vida Hanna por enseñarme a ser paciente, apoyarme incondicionalmente a lo largo de estos años compartidos en la carrera, darme animo cuando más lo necesitaba y ayudarme a crecer como ser humano cada día.

Jean Pierre Martínez Urueña

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicarle este trabajo a Dios, por darme la oportunidad de culminar uno de mis sueños, llenándome de mucha fortaleza para poder pasar todos los obstáculos que se me presentaron en el camino, y que hoy en día recibiré el fruto de ello. A mis papás y mi hermana Mónica, por apoyarme incondicionalmente en todo esta trayectoria, siempre resaltando mis cualidades y habilidades para poder seguir adelante y no rendirme en el camino para así llegar a ser una gran persona y profesional, en especial a mi sobrino Mathias, quien ha sido mi acompañante en todo mi proceso académico desde el inicio de pandemia, donde nació.

Por otro lado, quiero agradecer a mis amigas de infancia, en especial a Diana Campo, quienes me han acompañado por más de 12 años y han sido testigos de toda la trayectoria por la que he pasado, apoyándome en cada momento donde más difíciles se hacían las cosas y siempre recalcando esa parte que para ellas, me caracteriza como persona. Así mismo, agradezco a todos mis compañeros y amigos que nacieron en la universidad, con los que comparto desde primer semestre y a los que llegaron durante el camino, en los que vieron un apoyo en mí y confiaron hasta el día de hoy, son muchas historias de las que podemos contar de cómo nos formamos como persona y también profesionalmente a través de estos 5 años. Me llevo unos excelentes amigos, caracterizados por sus personalidades y lo más importante, unos grandes ingenieros.

Por último, quiero dedicarle esta tesis a Jean, nos conocimos desde primer semestre y quien diría que, como fruto, vendríamos a encontrar un gran y verdadero amor, el cual ha durado casi tres años. Aparte de ser un excelente y paciente novio, es un gran ser humano y estudiante lleno de cualidades que lo caracterizan y le permitirá ser un gran Ingeniero lleno de logros. También a toda su familia, quien nos apoyó y brindó toda su colaboración en el proceso de nuestra carrera y en especial en este trabajo de grado. Así mismo a nuestro perrito Percy, quien siempre nos acompañó en cada uno de las traspasadas y nos brindó un momento de felicidad y cariño en esos momentos donde más estrés teníamos.

Hanna Suarez Parra

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de primeras a Dios, por permitirme llegar hasta este momento en donde culmino uno gran logro de mi vida gracias a la fortaleza que me dio durante el camino. Le quiero dar muchas gracias a mis papás, mi hermana y mi sobrino quienes estuvieron presente en todo mi camino y me apoyaron en cada decisión que tome por autonomía y que hoy se recoge un gran fruto. A todos mis amigos y compañeros que estuvieron conmigo desde mi niñez y a los que conocí en este camino profesional.

De igual forma, agradezco a la Universidad de América y a todo el cuerpo de docentes que hizo parte de mi camino profesional y me brindaron sus conocimientos para poder llegar a ser Ingeniera. A nuestra directora de grado Adriana Suesca, quien acogió el proyecto con dedicación y nos brindó todos sus conocimientos para poder obtener este exitoso resultado, siempre pendiente de nuestras dudas y avances.

Por último, a mi compañero y gran amor Jean, quien puso todo su esfuerzo, brindando todo su conocimiento y dedicándole todo su tiempo a este proyecto para obtener un excelente resultados. Así mismo a la señora Luz Dary quien estuvo siempre apoyando toda la parte experimental del proyecto junto con nosotros.

Hanna Suarez Parra

Agradezco a Dios por permitirme llegar hasta donde me encuentro hoy, ya que sin el nada de esto sería posible. A mi madre Luz Dary por su ayuda en cada etapa desarrollada de este proyecto aportando con sus ideas y opiniones. Así mismo, a cada docente de la Universidad de América que participó en mi formación a lo largo de estos años de carrera y a mi compañera de tesis por su compromiso día a día con el proyecto.

A la ingeniera Quimia Adriana Suesca que, al ser nuestra directora de proyecto, nos guio en el proceso aportando con sus experiencias y conocimientos con la mejor disposición.

Jean Pierre Martínez Urueña

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Esto corresponde únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 Clasificación de residuos	18
1.1.1 Según su origen	18
1.1.2 Según su descomposición	19
1.1.3. Según su impacto ambiental	19
1.2 Residuos Orgánicos Residenciales	20
1.2.1 Composición	20
1.2.2 Tratamiento de los residuos sólidos urbanos	21
1.2.3 Impacto ambiental	25
1.3 Compostaje	26
1.3.1 Tipos de compostaje	27
1.3.2 Fases presentes en el proceso de compostaje	31
1.3.3. Ruta química	33
1.3.4 Ruta física	37
1.3.5 Ruta biológica	38
1.3.6. Microorganismos	38
1.4 Abono orgánico.	39
2. DIAGNÓSTICO DE LOS RESIDUOS	43
2.1 Información de los residuos orgánicos	43
2.1.1. Situación del compostaje en Bogotá	43
2.2 Información de la Localidad	45
2.3 Producción de residuos orgánicos en el Conjunto Residencial Camino de la Esperanza	48
2.4 Caracterización de los residuos orgánicos residenciales	51
3. PROCESO DE COMPOSTAJE A NIVEL LABORATORIO	55
3.1 Selección del proceso de compostaje	55
3.1.1 Pilas estáticas aireadas	55

3.1.2 Pila dinámica	56
3.1.3 Reactor vertical	57
3.1.4. Reactor horizontal	57
3.2 Selección del tratamiento de lixiviados	59
3.2.1. Tratamiento anaerobio	60
3.2.2. Tratamiento Aerobio	60
3.2.3. Almacenamiento	60
3.2.4. Absorción.	60
3.2.5 Reinyección	61
3.3 Desarrollo experimental	61
3.3.1 Adecuación del terreno	61
3.3.2 Recolección de residuos	62
3.3.3 Diseño del reactor	62
3.3.4 Desarrollo experimental del compostaje	65
3.3.5 Desarrollo del tratamiento para lixiviados	71
3.4 Resultados y discusión del proceso de compostaje	71
3.4.1 Temperatura	72
3.4.2 Humedad	74
3.4.3 pH	74
3.4.4 Abono orgánico	75
3.5 Soluciones a los posibles problemas en las variables del proceso	77
3.5.1 Temperatura.	78
3.5.2. Humedad:	79
3.5.3 pH:	79
3.5.4 Relación Carbono/Nitrógeno	80
3.5.5 Aireación:	80
4. MICROORGANISMOS PARA ACELERAR EL PROCESO DE COMPOSTAJE	81
4.1 Contextualización de los microorganismos en el proceso de compostaje.	81
4.2. Estudio de microorganismos utilizados para acelerar el proceso de compostaje	82
5. ANÁLISIS DE COSTOS	96
5.1 Costos para la experimentación	96
5.1.1 Costos de inversión	96

5.2 Costos a gran escala	97
5.2.1 Costos de adecuación del terreno	98
5.2.2 Costos de mano de obra	98
5.2.3 Costos de inversión	100
5.2.4 Costos totales	101
5.3 Costos de inclusión de microorganismos	101
5.3.1 Costos de inversión	102
5.3.2 Costos totales	103
6. PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS RESIDENCIALES	104
6.1 Producción de residuos orgánicos y compost	104
6.2 Condiciones de operación	104
6.2.1 Tamaño de partícula	105
6.2.2 Humedad	105
6.2.3 Aireación	105
6.3 Diseño del reactor	105
6.3.1 Tamaño del reactor	106
6.3.2 Control de variables de proceso	108
6.4 Tratamiento de lixiviados	112
6.5 Proceso de compostaje con la inclusión de microorganismos.	112
7. CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFIA.	119
ANEXOS	130

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 <i>Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos</i>	21
Figura 2 <i>Tecnologías usadas en el tratamiento y valorización de los residuos sólidos</i>	22
Figura 3 <i>Esquema básico de una planta semiautomática de recuperación de materiales</i>	23
Figura 4 <i>Esquema básico de un digestor anaerobio de residuos</i>	24
Figura 5 <i>Incineradora de parrilla</i>	25
Figura 6 <i>Pila de compostaje pasivo</i>	27
Figura 7 <i>Hilera</i>	28
Figura 8 <i>Compostaje de pilas estáticas aireadas</i>	28
Figura 9 <i>Contenedores</i>	29
Figura 10 <i>Lecho agitado rectangular</i>	30
Figura 11 <i>Silo</i>	30
Figura 12 <i>Tubo giratorio</i>	31
Figura 13 <i>Perfil de temperatura en las etapas de compostaje</i>	33
Figura 14 <i>Clasificación de los abonos orgánicos</i>	40
Figura 15 <i>Normativa Colombiana del abono orgánico</i>	41
Figura 16 <i>Localidad de Bosa y sus delimitaciones</i>	46
Figura 17 <i>Ubicación satelital del Conjunto Residencial Camino de la Esperanza</i>	49
Figura 18 <i>Conjunto Residencial Camino de la Esperanza</i>	49
Figura 19 <i>Cuarteo de los residuos orgánicos</i>	52
Figura 20 <i>Pilas estáticas aireadas</i>	56
Figura 21 <i>Pila dinámica</i>	56
Figura 22 <i>Reactor vertical</i>	57
Figura 23 <i>Reactor horizontal</i>	58
Figura 24 <i>Caneca de polietileno</i>	63
Figura 25 <i>Base del reactor</i>	65
Figura 26 <i>Reactor horizontal</i>	65
Figura 27 <i>Diagrama BFD del proceso de compostaje</i>	66
Figura 28 <i>Residuos orgánicos utilizados al inicio del proceso de compostaje</i>	66
Figura 29 <i>Balace de materia</i>	67

Figura 30 <i>Medidor multifuncional de suelos</i>	70
Figura 31 <i>Grafica de temperatura vs el número de mediciones</i>	72
Figura 32 <i>Cambio de las propiedades fisicoquímicas de los residuos orgánicos</i>	73
Figura 33 <i>Grafica del pH con respecto al número de mediciones</i>	75
Figura 34 <i>Abono orgánico</i>	76
Figura 35 <i>Grafica de la frecuencia del género de bacterias adicionadas al proceso</i>	87
Figura 36 <i>Grafica de la frecuencia del género de hongos adicionadas al proceso</i>	87
Figura 37 <i>Termómetro</i>	109
Figura 38 <i>pH - metro</i>	109
Figura 39 <i>Medidor de humedad</i>	110
Figura 40 <i>Trituradora</i>	111
Figura 41 <i>Selladora manual</i>	111
Figura 42 <i>Medios de cultivos</i>	113
Figura 43 <i>Erlenmeyer de 2L de vidrio de borosilicato</i>	113
Figura 44 <i>Bomba de pecera</i>	114
Figura 45 <i>Diagrama de flujo del proceso</i>	115

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 <i>Toneladas de residuos orgánicos recolectados en el 2020</i>	47
Tabla 2 <i>Propiedades de la materia prima</i>	51
Tabla 3 <i>Resultados de laboratorio de los residuos sólidos</i>	53
Tabla 4 <i>Ventajas y desventajas de los tipos de procesos</i>	58
Tabla 5 <i>Medidas del reactor</i>	63
Tabla 6 <i>Medidas del tubo de aireación</i>	64
Tabla 7 <i>Medidas de las bases del reactor</i>	64
Tabla 8 <i>Peso de los residuos</i>	68
Tabla 9 <i>Medidas de humedad</i>	69
Tabla 10 <i>Resultados del laboratorio del abono orgánico</i>	76
Tabla 11 <i>Problemas y soluciones presentados en el manejo de la temperatura</i>	78
Tabla 12 <i>Problemas y soluciones presentados en el manejo de la humedad</i>	79
Tabla 13 <i>Problemas y soluciones presentados en el manejo del pH</i>	79
Tabla 14 <i>Problemas y soluciones presentados en la relación C/N</i>	80
Tabla 15 <i>Problemas y soluciones presentados en la aireación</i>	80
Tabla 16 <i>Artículos con adición de microorganismos al proceso de compostaje</i>	83
Tabla 17 <i>Costo de inversión de la materia prima para la construcción del reactor</i>	96
Tabla 18 <i>Costos para la adecuación del terreno</i>	98
Tabla 19 <i>Costos del operario</i>	99
Tabla 20 <i>Costos del Ingeniero</i>	99
Tabla 21 <i>Costos de inversión de equipos y materiales</i>	100
Tabla 22 <i>Costos totales</i>	101
Tabla 23 <i>Costos de inversión con la inclusión de los microorganismos</i>	102
Tabla 24 <i>Costos totales con la inclusión de microorganismos</i>	103
Tabla 25 <i>Dimensionamiento del reactor</i>	107
Tabla 26 <i>Dimensiones de la base de lixiviados</i>	107
Tabla 27 <i>Control de las variables del proceso</i>	108

LISTA DE ABREVIATURAS

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

DA: Digestión anaerobia

RSDJ: Relleno Sanitario Doña Juana

Ton: Toneladas

Kg: Kilogramo

m/mo: Microorganismos

C/N: Relación Carbono / Nitrógeno

T amb: Temperatura ambiente

RESUMEN

El presente proyecto de grado buscó evaluar el proceso de producción de compostaje usando residuos orgánicos residenciales y estudió cómo influye la intervención de una mezcla de microorganismos en el proceso, brindando una alternativa para producir abono orgánico y contribuir al buen uso del medio ambiente.

En primer lugar, se partió de un estudio acerca de la producción de compostaje sin la adición de microorganismos teniendo en cuenta las características fisicoquímicas y las condiciones adecuadas de operación, realizando una producción a escala laboratorio donde se midan cada una de ellas. Luego se seleccionó los microorganismos que favorecen a la degradación de la materia prima basándose en una revisión bibliográfica de 20 artículos donde se estudió la manera de inoculación de cada uno y se observó su influencia en el proceso, analizando sus propiedades.

Posteriormente se realizó un análisis de costos para cada uno de los procesos de producción de abono, haciendo un estimado de la factibilidad económica donde se incluye costos de inversión y mano de obra. Finalmente se presentó la propuesta que debe ser entregada al conjunto con cada una de las indicaciones para el desarrollo del proceso, abarcando todos los parámetros que se deben controlar al momento de poner en marcha la producción.

Palabras clave: Compostaje, residuos orgánicos residenciales, mezcla de microorganismos, abono orgánico.

INTRODUCCIÓN

En la última década se ha evidenciado un crecimiento exponencial de la población a nivel mundial, lo que origina un mayor consumo de servicios públicos y un aumento en la producción industrial, comercial y agrícola. Todas estas actividades generan toneladas de residuos, entre ellos orgánicos, inorgánicos, tóxicos y peligrosos, que contribuyen a la contaminación del medio ambiente. La ciudad de Bogotá, la cual cuenta con ocho millones de habitantes, genera alrededor de 6300 toneladas de residuos sólidos por día. Se han realizado estudios que indican que el 55,22% de los residuos son orgánicos biodegradables, de los cuales el 74% son generados por zonas residenciales. [1]

El manejo que se le ha dado a estos residuos consiste principalmente en recolección, transporte y disposición final en el relleno sanitario [1]. La descomposición de estos residuos se da por condiciones anaerobias generando gases que son liberados a la atmósfera, los cuales aumentan el efecto invernadero, contaminan acuíferos por los lixiviados y generan malos olores en la zona donde se encuentran y sus alrededores [2], generando problemas de salud pública como la reproducción de ratas, moscas y otros transmisores de enfermedades [3].

Esto conlleva a incumplir la ley 09 de 1979 y el decreto 2981 de 2013, los cuales están relacionados con la gestión integral de residuos, y causaría en los habitantes un riesgo a la salud debido a los gases y líquidos generados en la descomposición de estos. Sin embargo, existen diferentes alternativas que permiten utilizar todos estos desechos en materia prima como producción de bioabono, generación de biogas, compostaje o incineración con producción de energía [4].

Por esta razón, esta investigación busca brindar una alternativa para aprovechar los residuos orgánicos residenciales mediante la elaboración de compostaje produciendo abono orgánico y realizar un estudio sobre la influencia que tiene una mezcla de microorganismos sobre el proceso, de esta forma obtener un producto de alto uso comercial favoreciendo a la disminución de emisiones de efecto invernadero y contribuir a la economía aminorando los costos de producción y tratamiento, generando la opción de afiliarse a la tarifa multiusuario distrital para reducir los costos en la facturación de aseo de acuerdo al volumen de residuos sólidos generados por los habitantes del conjunto.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de compostaje de los residuos orgánicos residenciales incluyendo una mezcla de microorganismos para la producción de abono orgánico.

Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual del proceso de compostaje, las características fisicoquímicas de los residuos orgánicos residenciales y del abono orgánico.
- Diseñar un proceso de compostaje con residuos orgánicos residenciales.
- Seleccionar los posibles microorganismos que aceleran el proceso de compostaje.
- Realizar un análisis de costos de inversión del proceso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Clasificación de residuos

1.1.1 Según su origen

1.1.1.a. Residuos urbanos. Estos residuos son generados por actividades desarrolladas por zonas residenciales, comercio, y oficinas que se encuentran en el territorio. Dentro de estos se encuentran todos los residuos que están catalogados como no peligrosos y hagan parte de las anteriores actividades. [5]

1.1.1.b. Residuos comerciales. Son los residuos propios del comercio referentes a todo los servicios de restaurantes, bares, oficinas o mercados, así como del resto del sector relacionado al contexto [6].

1.1.1.c. Residuos industriales. Estos residuos son generados por todas las industrias que se encuentren en el terreno con respecto a su actividad como extracción, explotación, producción o fabricación, transformación, almacenamiento y distribución de los productos [7].

1.1.1.d. Residuos agrícolas. Estos residuos son generados por actividades agrícolas, ganaderas o forestales que no tienen un aprovechamiento posterior , incluyendo a todos los residuos de actividades agroalimentarias [8].

1.1.1.e. Residuos forestales. Son todos los residuos que se generan en todo lo relacionado a aprovechamiento forestal, una parte se usa como materia prima para transformar en madera y otra parte se usa como combustible [9].

1.1.1.f. Residuos sanitarios. Estos residuos son los relacionados con actividades sanitarias o técnicas de cuidado y mejora estética procedentes de centros médicos, farmacias, entre otros [10].

1.1.1.g. Residuos mineros. Son aquellos materiales provenientes de la explotación minera y de los relevantes de las plantas de tratamiento, según su origen ya sea de una operación de concentración o de lixiviación [11].

1.1.1.h. Residuos radiactivos. Estos residuos son todos los materiales o productos que contienen o están contaminados con radiación en concentraciones superiores establecidas por el Ministerio de Industria y Energía [12].

1.1.2 Según su descomposición

1.1.2.a. Residuos orgánicos. Son todos los materiales que provienen de la flora y fauna o de restos, sobras o productos de desechos de alguna actividad específica y que se pueden descomponer por la presencia de microorganismos [13]. Entre estos se encuentran: “restos de residuos vegetales y alimenticios (cuncho de café), papeles no aptos para reciclar que no tengan tintas, pasto, hojarasca, estiércoles de la cría de animales domésticos, residuos de cosechas, aserrines puros o con mezclas de excrementos animales, líquidos biodegradables, madera, y otros residuos que puedan ser usados fácilmente como materia prima” [1].

1.1.2.b. Residuos inorgánicos. Son aquellos que por sus características físicas no representan degradación mediante la acción biológica [14]. Entre ellos se encuentran los vidrios, chatarra, plásticos, residuos de demoliciones, entre otros. Estos residuos se clasifican en reciclables, los cuales no contaminan el medio ambiente, y los no reciclables no se pueden reaprovechar, por lo que se busca su respectiva disposición [14].

1.1.3. Según su impacto ambiental

1.1.3.a. Residuos peligrosos. Son los residuos que puede causar problemas al medio ambiente o a la salud de los seres vivos, ya que pueden ser tóxicos, corrosivos, reactivos, inflamables, explosivos, infecciosos o ecotóxicos. Estos residuos aumentan ya que no se reciclan, sino que se fabrican unos nuevos, especialmente en procesos industriales [15].

1.1.3.b. Residuos peligrosos no reactivos. Son residuos peligrosos que fueron sometidos a algún tratamiento por el que ha perdido su peligrosidad [15]

1.1.3.c. Residuos inertes. Son los residuos que no experimentan transformación física, química o biológica significativa durante el proceso [15].

1.1.3.d. Residuos no peligrosos. Son los residuos que no reaccionan ni física ni químicamente y que no afectan a otros materiales que contaminan al medio ambiente o perjudican la salud de los seres vivos. Algunos son biodegradables, reciclables o no reciclables [16]. Estos se pueden dividir en aprovechables como el papel, cartón, vidrio o plástico, no aprovechables como servilletas, toallas de manos, papel higiénico, material del barrido, y orgánicos biodegradables como los residuos de comida, material vegetal, etc.

1.2 Residuos Orgánicos Residenciales

Como se ha mencionado, son residuos que se descomponen naturalmente ya que presentan la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. El aprovechamiento de residuos orgánicos representa múltiples beneficios, además que se disminuye la problemática que viven las poblaciones aledañas al relleno sanitario, que en últimas son las personas más afectadas por el mal manejo de los residuos orgánicos en Bogotá. [1]

1.2.1 Composición

Conocer la composición de los residuos sólidos urbanos permite saber cuál es la fracción que posiblemente sea recuperable, de igual forma tiene gran importancia para tomar decisiones con respecto a la elección del tratamiento que se llevara a cabo. La composición de los residuos sólidos urbanos es enormemente variable y en ella influyen una serie de factores muy diversos [17]. Se puede decir que es consecuencia de: La población, bien sea urbana o rural que tenga áreas industriales, residenciales, turísticas o comerciales, la época de producción ya sea por el clima o la estación que se encuentre la región, el total de población y el habito de consumo en el territorio, evaluando el grado de afectación que causan en el medio ambiente [17].

“La composición de este tipo de basuras en nuestra ciudad revela lo siguiente: casi un 50% está formado por materia orgánica; el papel y el cartón suponen un 20%; el vidrio casi un 8%; los plásticos 7%; los metales 4% y el resto lo forman madera, textiles, cuero, goma, cerámicas, cenizas y productos diversos” [17].

Es por esto que en la Figura 1 se evidencia la clasificación de los residuos sólidos urbanos (RSU)

Figura 1

Clasificación de los residuos sólidos urbanos

Orgánicos	Reciclables	Ordinarios
Residuos de cocina crudos. Restos de comida cocinados. Restos de cosecha Desyerbes Forestales, podas Hojarasca Corte de césped Cascara de fruta y tubérculos Restos de verduras en general Vainas de granos Cascaras de huevo Cuncho de café Estiércoles Camas y lechos de cría de animales Aserrín y viruta de madera Papel y cartón libre de tintas Cenizas	Papel y cartón Plásticos Envases de Tetrapak Vidrio Metales (Aluminio, Cobre, Chatarra) Discos compactos Textiles (Telas, trapos, lanas e hilos) Botas de caucho Elementos desechables con prelavado	Papel higiénico Papel absorbente Usado: Servilletas, papel de cocina, faciales Pañales y elementos sanitarios Papel parafinado Papel plastificado Papel carbón Material papel o cartón impregnado de grasa Residuos de barrido Papel metalizado Caja y colillas de cigarrillos Materiales reciclables que se encuentran contaminados, sucios y/o húmedos.

Nota. Esta figura muestra la clasificación que se le asigna a todos los residuos sólidos orgánicos en la ciudad Bogotá. Tomado de [1] N. Martínez and P. Gonzales, “Guía Técnica Para el Aprovechamiento de Residuos Orgánicos,” *Grup. Investig. Sist. Integr. Prod. Agrícola y For.*, p. 159, 2014, [Online]. Available: http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf.

1.2.2 Tratamiento de los residuos sólidos urbanos

El tratamiento que deben tener los residuos se enfoca en la disminución del impacto ambiental negativo que estos generan en el entorno. Con esto, los residuos suelen ser sometidos a procesos que beneficien la parte técnica, ambiental y económica para la industria. Por lo que el tratamiento permite disminuir la cantidad de basura y así obtener un gran aprovechamiento de estos favoreciendo al medio ambiente. [18]

La valoración de estos residuos se destaca cuando se aprovecha todos los materiales haciendo cada uno de los tratamientos de forma correcta y teniendo el resultado final que se desea [18]. Para ello existen diferentes métodos que son usados en la industria para tratar los residuos como se observa en la Figura 2

Figura 2

Tecnologías usadas en el tratamiento y valorización de residuos sólidos

Tecnología	Métodos
Mecánicos	Clasificación; en función del interés económico o como paso previo a un procesamiento posterior.
	Trituración; reduce la granulometría y el volumen de los residuos, los mezcla y homogeniza
	Compactación; reduce los espacios vacíos (densifica los residuos).
Térmicos	Incineración; quema controlada, a alta temperatura, en equipos especialmente diseñados y con dispositivos de control ambiental
	Pirólisis; degradación térmica de los residuos en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo, a temperatura inferior a la de la incineración, que produce líquidos y gases de alto contenido energético, y menos contaminación atmosférica.
Biológicos	Aeróbico; indicado para estabilización y compostaje. Sus productos principales son el agua, el dióxido de carbono y el calor.
	Anaeróbico; importante en la producción de metano. La degradación de los residuos es más lenta y genera ácidos grasos, acético y otros de bajo peso molecular, inclusive algunos gases con malos olores y tóxicos (ejemplo, el ácido sulfhídrico -H ₂ S-).

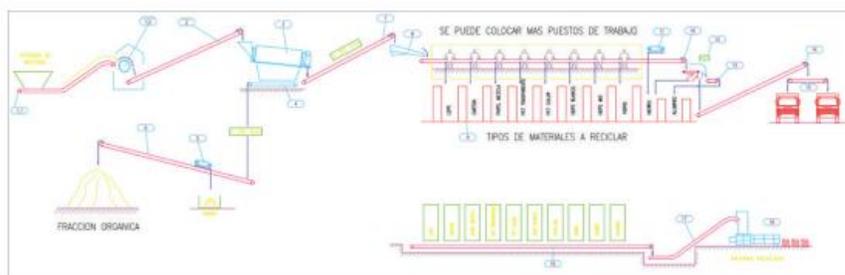
Nota: Esta figura muestra los diferentes métodos que se pueden usar para el tratamiento y valoración de los residuos sólidos. Tomado de [18] E. Rondon, T., N. M. Szantó, J. F. Pacheco, E. Contreras, and G. A., “Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios,” *Manuales la CEPAL*, p. 209, 2016, [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>

1.2.2.a. Separación selectiva mecánica. Es un proceso mecanizado que clasifica y separa los residuos, concentrándose en plantas tipo semi automáticas y automáticas dependiendo de los residuos que se van a tratar [19]. El total de los residuos sólidos ayuda a escoger los parámetros necesarios para la elección de la planta como el dimensionamiento de la misma, la cual permitirá

el aprovechamiento máximo de estos y así darle una valoración congruente con el mercado [19]. A continuación, en la Figura 3 se mostrará un esquema donde se observa el diseño de una planta semiautomática

Figura 3

Esquema básico de una planta semiautomática de Recuperación de Materiales Orgánicos



Nota: La figura representa el diseño de una planta semiautomática que permite transformar los residuos en materiales recuperados. Tomado de [19] P. Tello, D. Campani, and R. Diana, “GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,” *AIDIS*, p. 203, 2018.

1.2.2.b. Digestión aerobia. Es un proceso en el cual existe una intervención de microorganismos, los cuales requieren de la presencia de oxígeno para empezar el proceso de descomposición de los residuos sólidos, transformándola en un material mineralizado llamado compost [19]. El compostaje es una técnica mediante la cual se empiezan a descomponer los residuos orgánicos gracias a la presencia de los microorganismos que permitirán como resultado final un abono de calidad [20]. Este método se explicará detalladamente en el siguiente ítem.

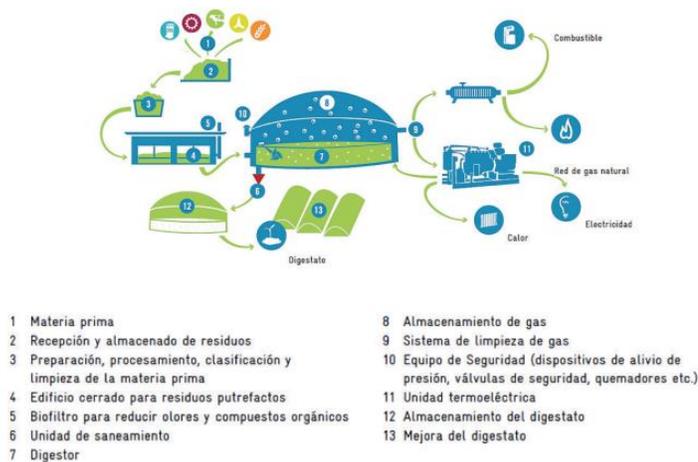
1.2.2.c. Digestión anaerobia. La digestión anaerobia (DA) es un proceso en el que en ausencia de oxígeno los microorganismos descomponen los residuos sólidos [19]. Este método se ha usado con mayor frecuencia en el sector de aguas residuales, específicamente en digestión de lodos o fangos, y en el sector de residuos agropecuarios, generalmente en excreta animal ya sea para aprovechar la energía del metano o biogas que son generados.

La DA consiste en un proceso que se caracteriza por diferentes parámetros, uno de estos es la temperatura, ya que dependiendo de esta se conoce en qué fase puede estar el proceso, ya sea mesófilo como termófilo, igualmente desde el punto de vista del proceso mecánico puede ser por lotes o continuo, y por último puede ser un proceso húmedo, seco o extra seco dependiendo del contenido de sólidos y aguas en el digestor. [19]

En la Figura 4 se puede observar el esquema de este método.

Figura 4

Esquema básico de un Digestor Anaerobio de Residuos



Nota: En la figura se evidencia el diseño de un esquema básico de un Digestor Anaerobio para residuos. Tomado de [19] P. Tello, D. Campani, and R. Diana, “GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,” *AIDIS*, p. 203, 2018.

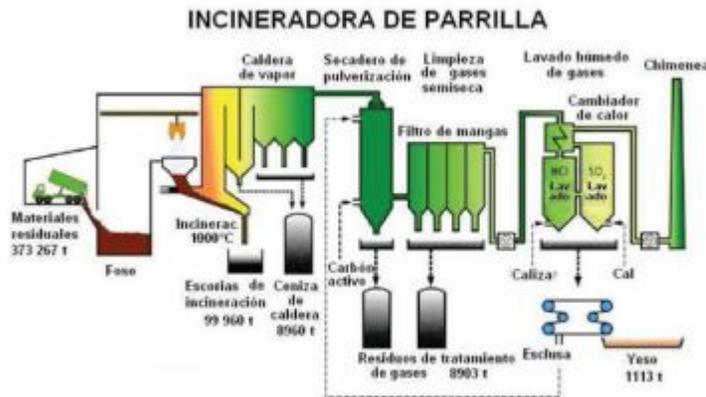
1.2.2.d Incineración. La incineración de los residuos sólidos consiste en la combustión u oxidación de los residuos bajo condiciones controladas [19]. En este método se transforman los residuos en material inerte, mejor conocido como cenizas, y en gases. Este sistema permite disminuir el peso inicial de la materia favoreciendo al proceso [18]. “La reducción de peso es aproximadamente del 70% y el volumen del 80% o 90% dependiendo fundamentalmente del contenido de fracciones de combustibles e inertes” [18].

“La incineración se lleva a cabo en condiciones controladas de temperatura, que puede oscilar en un rango de 850 a 1100°C en un horno de parrillas. Existen diferentes tipos de incineración, que

depende principalmente del tipo de horno donde se lleva a cabo la combustión de los residuos: Horno de parrillas móviles, Horno de lecho fluidizado, Horno rotatorio” [19]. A continuación, en la Figura 5 se muestra un ejemplo de incineración:

Figura 5

Incineradora de parrilla



Nota: En la figura se observa el diseño de una planta de la incineración por parrillas. Tomado de [19] P. Tello, D. Campani, and R. Diana, “GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,” *AIDIS*, p. 203, 2018.

1.2.2.e. Pirólisis. Es un proceso térmico para los residuos sólidos, netamente anaeróbico que requiere combustible para efectuar el proceso, por lo que toda la materia se descompone por acción de calor generando subproductos con alto potencial energético. Suele manejar temperaturas entre los 600 a 900°C por lo que se aplica para todos aquellos residuos con mayor porcentaje de materiales orgánicos [19]

1.2.3 Impacto ambiental

Existen diferentes factores ambientales que se ven afectados por el mal manejo de los residuos sólidos, entre ellos están

1.2.3.a. Recursos hídricos. Las aguas superficiales se pueden contaminar con materia orgánica, ya que por medio de los microorganismos y el oxígeno se generan compuestos que acidifican el agua, eliminando sus propiedades fisicoquímicas y afectando las especies acuáticas e igualmente la salud de los seres humanos. Por otro lado, la contaminación de agua subterránea es por la presencia de los lixiviados que desembocan en este lugar o que se pueden filtrar. Esto puede llegar a tener un alto costo y afectar tanto el recurso como las comunidades que dependen de este. [21]

1.2.3.b. Recurso atmosférico. Los residuos sólidos al descomponerse generan malos olores y gases, como metano y dióxido de carbono, que aumentan el efecto invernadero en la región, por esto, este proceso de descomposición se puede controlar con una correcta disposición de los residuos sólidos. De igual forma, al momento de quemar estos residuos se generan humos y material particulado que causa problemas en la salud de los seres vivos y contribuye al efecto invernadero. [21]

1.2.3.c. Recursos suelos. Principalmente los suelos se ven afectados por la presencia de lixiviados ya que estos se filtran afectando su productividad y acabando con la flora y fauna que habita en estos. Como consecuencia se aumenta el proceso de desertificación de los suelos [21].

1.3 Compostaje

Según la FAO, el compostaje es un proceso biológico aerobio, el cual, junto con la adecuación de humedad y temperatura, genera un proceso en donde la materia orgánica se transforma en un material homogéneo y asimilable por las plantas. Todo este proceso ocurre por la presencia de microorganismos, que junto con la presencia del oxígeno se aprovechan de los nutrientes que están dentro del proceso como el nitrógeno y el carbono, permitiéndoles crear su propia biomasa [22]. La fermentación puede ser natural (al aire libre) con una duración de más de cuatro meses o acelerada (en digestores) con una duración de más de 1 mes [18].

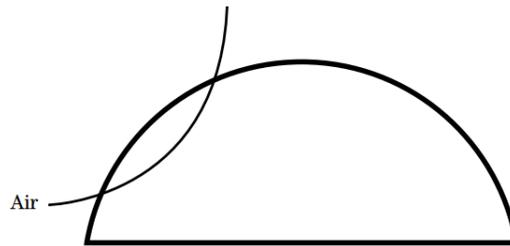
De acuerdo con la norma técnica colombiana NTC-1927, “el compostaje es el proceso de biooxidación aerobia de materiales orgánicos que conduce a una etapa de maduración mínima (estabilización), se convierte en un recurso orgánico estable y seguro para ser utilizado en la agricultura” [23].

1.3.1 Tipos de compostaje

1.3.1.a Pila de compostaje pasivo. Este método se basa en generar pilas a partir de una mezcla de residuos orgánicos. Todo este proceso se centra en la aireación, la cual se logra a través de un movimiento pasivo por lo que se busca que las pilas sean pequeñas para una mejor aireación, y se debe voltear periódicamente para reconstruir la porosidad. Esta técnica se considera uno de las más lentas debido a la aireación por lo que las condiciones anaeróbicas son mayores [24]. En la Figura 6 se puede observar la técnica para este método

Figura 6

Pila de compostaje pasivo

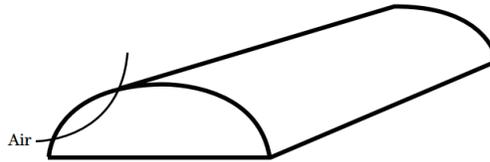


Nota: En la figura se observa el esquema de una pila de compostaje pasivo junto con la aireación que se presenta en este método. Tomado de [24] N. Engineering, “Chapter 2 Composting,” no. February, 2000.

1.3.1.b. Hileras. Este método consiste en conformar hileras de residuos, conocidas comúnmente como montones, y airearlas periódicamente sin importar el método a utilizar. Normalmente las hileras tienen una altura de 6 a 10 pies, 15 a 20 pies de ancho y más de 100 pies de largo. Debe tener un tamaño grande para mantener la temperatura y generar el calor suficiente para el proceso. Para mantener la porosidad debe haber una aireación adecuada por lo que se deben realizar volteos constantes a las pilas, el cual ayuda a liberar calor, vapor de agua y gases permitiendo un mejor proceso para el compost. Este tipo es apto para una amplia cantidad de residuos que son generados tanto por ciudades o municipios [25], [24]. En la Figura 7 se puede observar el esquema de una hilera.

Figura 7

Hilera

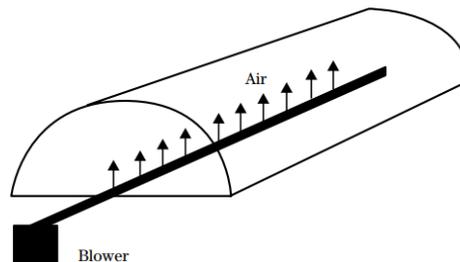


Nota: En la figura se observa el método de hilera para aplicar el compostaje. Tomado de [24] N. Engineering, "Chapter 2 Composting," no. February, 2000.

1.3.1.c. Compostaje de pilas estáticas aireadas. En este método los residuos se mezclan generando una gran pila la cual necesita de aireación, por lo que se utilizan sopladores que succionan aire de la pila o también las pilas se pueden colocar sobre una red de tuberías que permiten el suministro de aire, estos sirven no sólo para proporcionar oxígeno sino también para proporcionar refrigeración. Normalmente, este método tiene una duración de tres a seis meses [24],[25]. En la Figura 8 se puede observar un esquema de este método.

Figura 8

Compostaje de pilas estáticas aireadas



Nota: En esta figura se observa el esquema del compostaje en pilas estáticas aireadas. Tomado de [24] N. Engineering, "Chapter 2 Composting," no. February, 2000.

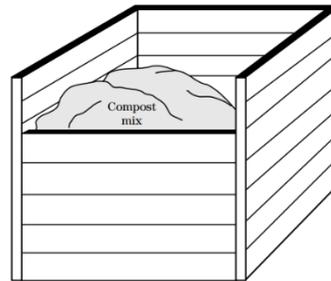
1.3.1.d. Compostaje en recipiente. Este método consiste en introducir materiales orgánicos en un tambor, silo, zanja revestida de hormigón o equipo similar [25]. Este método permite controlar con precisión todas las condiciones ambientales como la temperatura o humedad, por lo que el material se mezcla mecánicamente para mejorar la aireación [25].

A continuación, se explicará cada uno de los recipientes en los cuales se puede realizar.

- Contenedores: Se utilizan contenedores de madera los cuales tiene sistemas de aireación similares a los de las pilas estáticas de aireación forzada. El material se debe voltear regularmente para mantener el compostaje aeróbico [24]. En la Figura 9 se observa el esquema de este método.

Figura 9

Contenedores

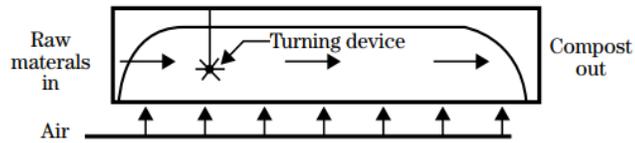


Nota: En la figura se observa el esquema del método de compostaje en recipientes por contenedores. Tomado de [24] N. Engineering, "Chapter 2 Composting," no. February, 2000.

- Lecho agitado rectangular. Se utiliza lechos largos y angostos durante el proceso y un volteador automático que funciona periódicamente, el cual se apoya sobre rieles que se montan en los extremos en toda su longitud. En algunos sistemas, también se utilizan sopladores para forzar el ingreso de aire a los lechos. La duración de este método depende de la longitud y la frecuencia de volteos que se realicen durante el proceso [24]. En la figura 10 se observa el esquema de este método.

Figura 10

Lecho agitado rectangular

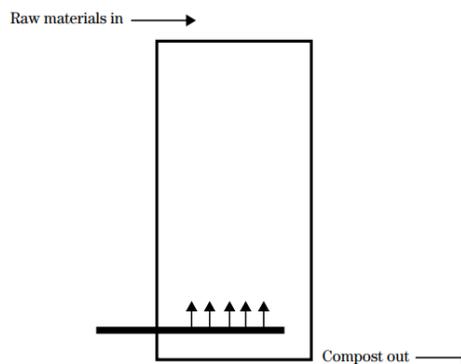


Nota: En la figura se observa el esquema del método del compostaje en recipiente por lecho agitado rectangular. Tomado de [24] N. Engineering, "Chapter 2 Composting," no. February, 2000.

- Silo. En este método el compostaje requiere específicamente de una etapa de curado. El material de compost se carga en el silo por la parte superior y se retira por la parte inferior con una barrena. La aireación se proporciona a través de la base del silo para que el aire sea forzado hacia arriba a través del material de compostaje [24]. En la Figura 11 se observa el esquema de un silo.

Figura 11

Silo

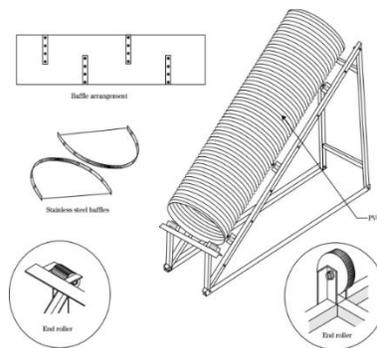


Nota: En la figura se observa el esquema del método del compostaje en recipiente por silo. Tomado de [24] N. Engineering, "Chapter 2 Composting," no. February, 2000.

- Tubo giratorio. Es un método que se puede utilizar cuando pocas cantidades de residuos requieren compostaje. La mezcla de compost se carga en la parte superior del tubo. La mezcla descansará en la primera placa deflectora. Cuando el tubo se ha llenado desde la primera placa deflectora hasta la parte superior del tubo, se gira para airear la mezcla de compost y vaciar el tubo por encima de la primera placa deflectora hasta llegar a su máxima capacidad [24]. En la Figura 12 se observa el esquema de este método.

Figura 12

Tubo giratorio.



Nota: En la figura se observa el esquema del método del compostaje en recipiente por tubo giratorio. Tomado de [24] N. Engineering, “Chapter 2 Composting,” no. February, 2000.

1.3.2 Fases presentes en el proceso de compostaje

1.3.2.a. Fase Mesófila. “En la primera fase (también llamada fase inicial), los compuestos ricos en energía y fácilmente degradables como azúcares y proteínas son abundantes, y son degradados por hongos, actinobacterias y bacterias, que por lo general se denominan como descomponedores primarios” [26].

En esta fase los microorganismos tienen una alta actividad que permite que su metabolismo produzca energía térmica, aumentando exponencialmente la temperatura. Por lo general, este proceso empieza a temperatura ambiente y en pocas semanas la temperatura aumenta hasta 45 °C. La intervención de los hongos se da tanto al inicio como al final de las etapas del compostaje y la participación de las bacterias se da durante el resto del proceso, en especial en la fuente de

carbono, por lo que superan a los hongos rápidamente. Se finaliza esta etapa cuando los microorganismos se acoplan a temperaturas altas, sustituyendo a las bacterias mesófilas y los hongos [27],[28],[29].

1.3.2.b. Fase termófila. La materia orgánica que se está degradando ahora es más compleja, como la celulosa, la lignina y las grasas [25]. Los microorganismos presentes en esta fase predominan debido a que degradan al grupo mesófilo ya que se presenta el proceso en temperaturas altas, lo que les permite adaptarse mejor. Es así que la descomposición durante esta fase avanza rápidamente, lo que produce más energía térmica, alcanzando temperaturas mayores a 60°C. De igual manera, la conversión de nitrógeno a amoníaco permite un aumento del pH en la pila de compost [26],[27],[28].

“Los hongos termófilos tienen máximos de crecimiento entre 35°C y 55°C, mientras que una temperatura más alta generalmente inhibe el crecimiento de hongos” [26]. En cuanto a las bacterias termófilas, como *Bacillus* y *Actinomycetes* dominan la comunidad microbiana de esta fase [27]. A pesar de que, durante el proceso, los microorganismos pueden degradarse hasta los 65°C la temperatura puede llegar a aumentar superando los 80°C. Por lo general, el aumento de la temperatura se debe a una reacción exotérmica que se presenta durante el proceso por enzimas termoestables de las actinobacterias. Esta fase es muy importante ya que gracias, tanto a la temperatura como a los microorganismos presentes, en específico las actinobacterias, son los que permiten la sanación del proceso [26].

1.3.2.c. Fase de enfriamiento. Esta fase inicia en el momento en que se empieza a agotar el sustrato, generando que la actividad microbiana cese y por ende empieza a disminuir la temperatura. Por lo que el compostaje es recolonizado por microorganismos que prefieren temperaturas entre 25°C a 40°C. En esta fase predominan microorganismos que degradan el almidón y la celulosa, a diferencia de la fase inicial donde los microorganismos se encargaban de degradar azúcares, oligosacáridos y proteínas. En cuanto a los hongos, como *Aspergillus* tienen el lugar de crecer en el compostaje, e igualmente es colonizada por bacterias y hongos que pueden beneficiar la salud y el crecimiento de la planta, como la especie *Mycoparasitic trichoderma* [26],[27].

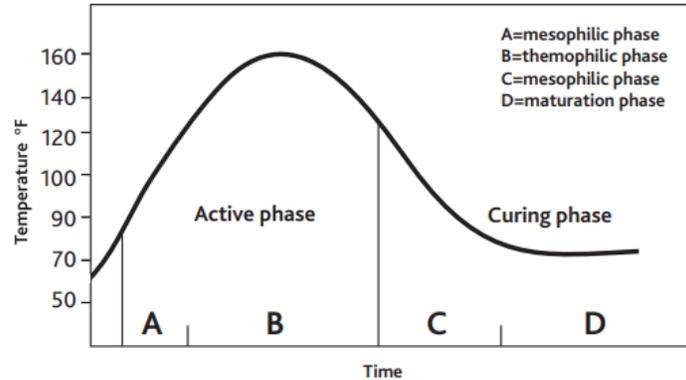
1.3.2.d. Fase de maduración. En esta última fase el sustrato decae, lo que altera todos los microorganismos presentes en el proceso. Intrínsecamente, los microorganismos permanecen

activos en el compost, pero estos ya no tienen un papel funcional como en las anteriores fases del proceso [27].

La representación de todas etapas mencionadas anteriormente se puede observar en la Figura 13

Figura 13

Perfil de temperatura en las etapas de compostaje



Nota: En esta figura se observa el perfil de temperatura que tiene el proceso del compostaje en cada una de las etapas presentes. Tomado de [30] E. Stentiford and M. de Bertoldi, “Composting: Process,” *Solid Waste Technol. Manag.*, vol. 2, pp. 513–532, 2010, doi: 10.1002/9780470666883.ch34.

1.3.3. Ruta química

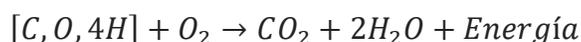
La ruta química se desencadena por acción de ciertas enzimas que son producidas tanto por las bacterias como por los hongos, estas ayudan a descomponer compuestos orgánicos complejos y absorben los compuestos más fáciles. Las reacciones que son catalizadas por las enzimas en las que se oxidan azúcares, almidones, proteínas y otros compuestos orgánicos, producen finalmente dióxido de carbono, agua, energía y compuestos resistentes a una mayor descomposición [31].

En tanto que la materia se descompone ciertos nutrientes como el nitrógeno, el potasio y el fósforo se liberan y se reutilizan en diversas formas a través de los microorganismos que componen todo el proceso. En un primer lugar, las proteínas se descomponen en aminoácidos como la glicina o la cisteína. Estos compuestos que contienen nitrógeno y azufre luego se

descomponen aún más, produciendo iones inorgánicos simples como amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}) que quedan disponibles para ser absorbidos por los microorganismos [30].

Los dos modos posibles de metabolismo productor de energía para los microorganismos heterótrofos son la respiración y la fermentación.

Respiración. En este proceso, la respiración puede ser aerobia o anaerobia. En la respiración aerobia, los microorganismos usan el oxígeno para liberar la mayor parte de energía de la fuente de carbono, lo que conlleva a producir tanto dióxido de carbono como agua en el proceso [24].



Para obtener la conversión deseada se necesitan de diferentes reacciones que ayudan a liberar energía del proceso y también formar intermediarios orgánicos que permiten generar otras reacciones sintéticas [24]. Se elige la respiración aerobia sobre el anaerobio ya que genera más energía y opera a temperaturas altas por lo que lo hace un proceso más eficiente en el compostaje. De igual forma, la respiración aerobia utiliza en su mayoría compuestos orgánicos con fuente de energía que permiten la degradación del material del compostaje.

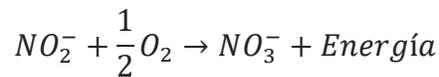
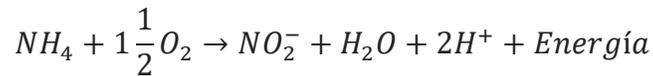
En la respiración anaeróbica, los microorganismos utilizan aceptores de electrones distintos del O_2 , como nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y carbonatos (CO_3^{2-}) para obtener energía. Estos aceptores producen compuestos indeseables como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el metano (CH_4) [24].

Fermentación. La fermentación es un proceso en donde la mayor parte del carbono descompuesto se convierte en productos finales liberando pequeñas cantidades de energía. Este proceso no requiere de oxígeno y se considera bastante ineficiente por su transformación [24].

La proteína no asimilada como residuo orgánico nitrogenado se descompone para obtener el nitrógeno necesario para la síntesis de los microorganismos heterótrofos. Tanto los residuos nitrogenados como las proteínas se someten a un proceso llamado aminización, en donde pasan por una oxidación enzimática para formar compuestos aminos. También se producen dióxido de carbono (CO_2), energía y otros subproductos [24].

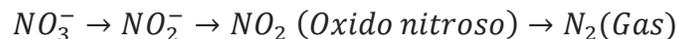
Proteínas + O₂ → compuestos aminos complejos + CO₂ + Energía + Otros productos.

Otra transformación química clave del proceso de compostaje es la nitrificación, el proceso donde el amoníaco se oxida a nitrato. Consiste de dos pasos: En el primero, el NH₄⁺ -N se oxida para formar nitritos (NO₂⁻) mediante la acción de bacterias autótrofas que utilizan la energía producida por esta conversión. Luego, los nitritos se convierten rápidamente en nitratos (NO₃⁻) por un grupo diferente de microorganismos llamados bacterias nitrificantes [24].

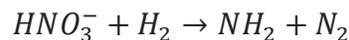


La nitrificación sucede en la última fase del compostaje debido a que los nitritos son tóxicos para las plantas y los nitratos permiten el producto final en el compost, es decir, el nitrógeno. Cabe resaltar que este proceso requiere de una aireación adecuada en la el tipo de compostaje ya que necesita oxígeno [24].

Otro tipo de transformación importante del nitrógeno es la desnitrificación. Esta ocurre en lugares casi anaerobios por lo que puede ser llevada por bacterias aerobias o anaerobias. Si la desnitrificación es llevada a cabo por bacterias aeróbicas, se utiliza nitrato en lugar de oxígeno como aceptor de hidrógeno, lo que da como resultado la siguiente progresión de nitrógeno [24].



Si la desnitrificación se lleva a cabo por bacterias anaerobias, la reacción general es:



El óxido nitroso se considera un compuesto oloroso y da la pérdida de nitrato-nitrógeno beneficiosos, por lo que no se desea la desnitrificación, evitando mantener condiciones aerobias en la pila debido a un aireación adecuada [24]. Es por esto que para obtener un compostaje adecuado se deben mantener las condiciones adecuadas para el crecimiento microbiano óptimo. Uno de los factores clave está entre la relación carbono y nitrógeno, contenido de humedad, oxígeno y pH.

1.3.3.a. Relación de carbono - nitrógeno. Los microorganismos que se presentan en el proceso requieren grandes cantidades de nutrientes como el carbono, nitrógeno, fósforo y potasio. La relación tiene una gran importancia en el compostaje ya que permite conocer los nutrientes presentes, y si estos están en la cantidad adecuada para que sea eficiente el proceso [24].

Es por esto que la relación de carbono-nitrógeno es importante ya que el carbono se utiliza como fuente de energía que permite el crecimiento de los microorganismos mientras que el nitrógeno se utiliza para sintetizar el material celular, aminoácidos y proteínas reciclándose constantemente por los microorganismos [24].

Las proporciones ideales de carbono a nitrógeno son alrededor de 25:1. Si existen inferiores a esta habrá un crecimiento rápido de los microorganismos y una rápida descomposición, pero el nitrógeno se perderá como amoníaco generando mal olor en el proceso y pérdidas de los nutrientes. Mientras que una relación superior no proporciona suficiente nitrógeno para el crecimiento de los microorganismos, generando que el compostaje permanezca frío y se degrade lentamente los residuos [31].

1.3.3.b. Oxígeno. Este es un elemento esencial para el metabolismo y la respiración de los microorganismos aerobios y para la oxidación de las moléculas orgánicas presentes en el material de desecho. Con el paso de la oxidación de la materia se va obteniendo tanto energía como nutrientes, por lo que se utiliza el oxígeno y se genera dióxido de carbono. Al no haber una aireación adecuada el proceso se convierte en anaeróbico produciendo mal olor incluyendo el del gas de sulfuro de hidrógeno. Por lo que es importante tener una aireación adecuada utilizando sistemas de aireación pasiva o forzada [30].

1.3.3.c. pH. Durante el curso del compostaje, el pH generalmente varía entre 5,5 y 8,5 [30]. Inicialmente el pH depende de los compuestos orgánicos, por lo que en la primera etapa los ácidos orgánicos generados por la descomposición pueden acumularse como subproductos de la materia orgánica de los microorganismos presentes en la etapa. La caída posterior del pH favorece el crecimiento de hongos, que son los principales microorganismos para descomponer la lignina y la celulosa. Generalmente los ácidos orgánicos se descomponen y el pH aumenta ya que durante la fase termófila ocurren dos procesos: la descomposición y volatilización de ácidos orgánicos y liberación de amoníaco por parte de los microbios a medida que descomponen las

proteínas y otras fuentes de nitrógeno orgánico. Después de esta fase el pH tiende a ser neutro ya que el amoníaco sale a la atmósfera, por lo que el proceso finaliza con un pH entre 6 y 8 [30].

1.3.4 Ruta física

En el proceso de compostaje también es importante encontrar las condiciones adecuadas, por lo que debe haber un equilibrio entre las propiedades físicas y los compuestos presentes en el proceso [30].

1.3.4.a. Aireación. Como ya se ha mencionado, el proceso de compostaje es aerobio, por lo que debe tener una aireación adecuada para que los microorganismos liberen el dióxido de carbono. Así mismo, la aireación también ayuda a reducir la compactación de agua en el material de compostaje. Debido a que el oxígeno se difunde más rápido a través del aire que a través del agua, la transferencia de oxígeno se dificulta si el agua llena los poros entre las partículas de compost. Sin embargo, si las finas películas de agua que rodean a las partículas individuales se secan, los microorganismos presentes se inactivan [28], [31].

“Al comienzo del proceso de compostaje, la concentración de oxígeno en los espacios porosos es de aproximadamente 15 a 20%, y la concentración de CO₂ varía de 0,5 a 5%. A medida que avanza la actividad biológica, la concentración de CO₂ aumenta” [30]. Por ende, “el porcentaje de aireación mayor al 15% representa un descenso de temperatura y exceso de evaporación de agua haciendo que se detenga el proceso de descomposición” [28].

1.3.4.b. Humedad. La actividad microbiana y el nivel de humedad en el proceso de compostaje tiene una gran importancia entre sí, ya que los microorganismos utilizan el agua presente en la materia prima para transportar nutrientes y energía a través de sus membranas celulares. Por lo que un contenido inicial de humedad entre el 50 y 60% se considera óptimo para el proceso ya que proporciona el agua suficiente para el crecimiento de los microorganismos, pero no tanto para el flujo de aire. Mientras que cuando la humedad disminuye entre 35 al 40% los microorganismos se inhiben porque las películas se están secando. En el otro extremo, cuando la humedad está por encima del 65% se da una descomposición más lenta de los residuos, genera mal olor en el proceso y hay presencia de más líquido lixiviado [28], [30].

1.3.5 Ruta biológica

Sin importar el método que se utilice para realizar el proceso de compostaje, los microorganismos juegan un papel importante en la descomposición de los residuos. Cabe resaltar que los más vitales son los microorganismos, sin embargo, las lombrices y otros invertebrados también son claves en algunos tipos de compostaje. La población microbiana que se desarrolla durante el proceso es gracias a los diferentes rangos de temperatura, humedad, oxígeno y pH, estos microorganismos degradan una amplia gama de compuestos, desde aminoácidos y azúcares hasta proteínas y carbohidratos complejos [24],[31].

1.3.6. Microorganismos

Todos los tipos de compostaje dependen del trabajo de hongos y bacterias. Durante el compostaje varios tipos de microorganismos aumentan y disminuyen acorde a la fase en la que se encuentre el proceso, siempre y cuando las condiciones ambientales y las fuentes de alimentación sean las adecuadas, luego mueren y dejan nuevas condiciones que pueden favorecer a otros microorganismos [30]. Estos se dividen en:

1.3.6.a. Bacterias. Las bacterias son los microorganismos más importantes en el proceso ya que son responsables de la mayor parte de la descomposición de los residuos y la generación de calor en el proceso. Así mismo, son el grupo con mayor nutrientes en el compostaje, y utilizan una amplia gama de enzimas para descomponer químicamente la materia orgánica. La gran mayoría son unicelulares básicamente con tres tipos de formas celulares: cocos, bacilos y espirilos [31],[24].

En el compostaje desde un inicio predomina las bacterias mesófilas con una temperatura de hasta 40°C. “Incluyen bacterias oxidantes del hidrógeno, oxidantes de azufre, nitrificantes y fijadoras de nitrógeno. Sus poblaciones aumentan exponencialmente durante las etapas iniciales del compostaje, ya que aprovechan los compuestos simples fácilmente disponibles, como azúcares y almidones” [30]. Es así, como el calor producido se da por la actividad metabólica y con las condiciones adecuadas, haciendo que el compostaje empiece a aumentar la temperatura [30].

Después de la fase termófila, empieza a caer la actividad microbiana termofílica debido a un cambio de temperatura por lo que nuevamente predominan las bacterias mesófilas. La variedad de los microorganismos mesófilos que recolonizan el compostaje en la etapa de maduración depende de las esporas y los microorganismos que estén presentes en el proceso. Por ende, a medida que avanza la fase de maduración, los microorganismos aumentan gradualmente [30].

1.3.6.b. Actinobacterias. “Las actinobacterias prefieren pH neutros o levemente alcalino, juegan un importante rol en la degradación de moléculas orgánicas complejas como celulosa, lignina, quitina y proteínas” [26]. Aunque no compiten bien por los carbohidratos simples que abundan en las etapas iniciales del compostaje, sus enzimas les permite descomponer químicamente los residuos resistentes [26].

La mayoría son termofílicos ya que se encuentran en un rango de temperatura de 50 a 60°C. Crecen mejor cuando el sustrato está húmedo y el suministro de oxígeno es bueno. Estas condiciones suelen darse cuando los sustratos que se pueden degradar fácilmente ya han sido consumidos por las bacterias y cuando las temperaturas superan los 45°C [26].

1.3.6.c. Hongos. Estos microorganismos, incluyendo las levaduras, son responsables de la descomposición de muchos polímeros vegetales complejos que se encuentran en el proceso, incluyendo desechos duros como la celulosa [30]. “Pueden atacar residuos orgánicos demasiado secos, ácidos o bajos en nitrógeno para la descomposición bacteriana. La mayoría de los hongos secretan enzimas digestivas en los alimentos y luego absorben los productos de digestión extracelular” [30].

1.4 Abono orgánico.

“El abono orgánico es el material resultante de la descomposición natural de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio, los cuales digieren los materiales transformándolos en otros benéficos que aportan nutrientes al suelo y por tanto a las plantas que crecen en él” [32]. Tiene alto niveles de nitrógeno mineral y otros nutrientes que son beneficiosos para las plantas, originando un aumento en la materia orgánica del suelo, como la retención de pH y humedad, y también aumenta el potasio, calcio y magnesio disponible. En

cuanto a las propiedades físicas mejoran la infiltración de agua, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica estableciendo un buen estado fitosanitario de las plantas [32].

Cabe resaltar que existen diferentes tipos de abonos orgánicos y estos se pueden clasificar dependiendo de su fuente de nutrientes, el estado físico y el grado de procesamiento. En la Figura 14 se observa esta clasificación.

Figura 14

Clasificación de los abonos orgánicos.

Fuente de nutrientes	Grado de procesamiento	Sólidos	Líquidos
Materia orgánica	Sin procesar	Residuos vegetales: - Residuos de cosecha - Residuos de poda - Residuos de postcosecha Residuos de animales - Estiércoles frescos Residuos de mataderos y otros Coberturas Abonos verdes y mulch	Efluentes: - Pulpa de café - Desechos de origen animales - Otros residuos líquidos
	Procesados	-Compost - Lombicompuestos - Bocashi - Ácidos húmicos	-Biofermentos - Te de compost - Ácidos húmicos - Te de estiércol - Extractos de alga

Nota: En esta tabla se observa la clasificación del abono orgánico en donde se clasifica por estados, grado de procesamiento y fuente de nutrientes. Tomado de [31] E. Ramos Agüero, David; Terry Alfonso, “Generalidades de los Abonos Orgánicos: Importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas.” *Cultiv. Trop.*, vol. 35, pp. 52–59, 2014, Accessed: Apr. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193232493007>

Los abonos que se usan en las plantas deben cumplir con las normas nacionales, de lo contrario se deben regir por las normas internacionales. En Colombia existe la norma técnica colombiana NTC-5167 la cual habla de los productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y

enmiendas o acondicionadores del suelo, en ella se encuentra los requisitos específicos que deben tener los abonos orgánicos en Colombia y se presentará en la Figura 15.

Figura 15

Normativa Colombiana para el abono orgánico.

Clasificación del producto	Iniciaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros a caracterizar	Parámetros a garantizar (en base húmeda)
Abono orgánico	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 contiene 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 35% - Para mezclas, el contenido de humedad estará dado por el origen del material predominante. Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15% $N_1P_2O_5$ y K^2O totales (declararlos si cada uno es mayor de 1%) Relación C/N <20 Capacidad de intercambio catiónico, mínimo 30 cmol (+) Kg (meq/100g) Capacidad de retención de humedad mínimo su propio peso pH mayor de 4 y menor de 9 Densidad máxima 0,6 g/cm ³	Contenido de carbono orgánico oxidable total (%C) Humedad máxima (%) Contenido de Cenizas (%) Capacidad de intercambio catiónico (cmol (+) kg1) (meq/100g) Capacidad de Retención de Humedad (%) pH Contenido de Nitrógeno Total (%N) Densidad (g/cm3)

Clasificación del producto	Iniciaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros a caracterizar	Parámetros a garantizar (en base húmeda)
		Límite máximo de mg/Kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación - Arsénico (As) 41 - Cadmio (Cd) 39 - Cromo (Cr) 1 200 - Mercurio (Hg) 17 - Níquel (Ni) 420 - Plomo (Pb) 300 Se indicará la materia prima de la cual procede el producto	
		La suma de estos parámetros debe ser 100	

Nota: En la figura se muestran los parámetros que se evalúan al momento de presentar un abono para conocer la calidad de este. Tomado de [33] N. Técnica, T. A. Colombiana, C. Requisitos, and T. Requisitos, “PRODUCTOS PARA LA INDUSTRIA AGRÍCOLA PRODUCTOS ORGÁNICOS USADOS COMO ABONO O FERTILIZANTES Y ENMIENDAS DE SUELO,” 2004.

2. DIAGNÓSTICO DE LOS RESIDUOS

2.1 Información de los residuos orgánicos

2.1.1. Situación del compostaje en Bogotá

Bogotá D.C. se considera una de las ciudades más grandes de Colombia, con un total de casi 7,2 millones de habitantes en el 2018, tiene una extensión de 177.598 hectáreas, de las cuales el 73% es área rural y el 27% restante es área urbana [1], ya que cuenta con 20 localidades y con uno de los páramos más grande del mundo. Es por esto, que “Bogotá cumple una función estratégica ya que el 97,6% de las áreas protegidas de la ciudad se ubican en área rural y corresponde al 63,1% del total del suelo rural” [1].

Así mismo, “Bogotá pasó de una población de cuatro millones 900 mil habitantes a siete millones 200 mil, según el censo de población de 2018. En este mismo lapso, la ciudad pasó de desechar 2.597 toneladas diarias de basura en 1988 a 6800 toneladas diarias en la actualidad” [34]. “Algunos estudios indican que la composición de los residuos urbanos en Bogotá posee alrededor del 55,22% de residuos orgánicos biodegradables (en su mayoría el 74% generados por usuarios residenciales)” [1]. Todos estos residuos tienen un transporte final a los Rellenos Sanitarios que dispone la ciudad.

El principal motivo por el cual se creó este relleno es con el fin de depositar toda la basura proveniente de la ciudad, en este se deposita la basura con el propósito de cubrirla diariamente de tierra y material arcilloso así se evitan los malos olores y la presencia de roedores y moscas que pueden ser portadores de enfermedades. Sin embargo, el relleno se ha convertido en un problema para la ciudad debido al crecimiento que se ha evidenciado en la población en los últimos años y los hábitos de consumo que se tiene la sociedad, esto ha causado un descontrol sobre todos los residuos que han llegado diariamente y también sobre los productos que generan estos residuos al estar expuestos al ambiente por lo que contaminan el ecosistema [34].

Un ejemplo pueden ser los líquidos lixiviados, los cuales son generados por la descomposición de estos desechos, presentando un alto riesgo en la contaminación de aguas subterráneas y el

suelo de los alrededores. Un ejemplo se encuentra en el RSDJ, los líquidos lixiviados se desechan al río Tunjuelito, y este a su vez desemboca en el río Bogotá lo que ha causado una alteración en la fauna y flora existente en este hábitat, los cuales fueron reemplazados por moscas y roedores [35]. De igual manera, otro factor que salió de control fue los malos olores provenientes del lugar ya que no se realizó el proceso adecuado para la descomposición de los residuos como consecuencia de las fallas operativas del relleno sanitario, razón por la cual se han creado olores putrefactos y gases que contaminan el aire de la zona y por ende de toda la ciudad.

Estos problemas sanitarios han generado el incumplimiento de varias normas estipuladas por el ministerio de ambiente. Una de estas es la Ley 9 de 1979, la cual habla sobre la protección del medio ambiente, e igualmente el decreto 2981 de 2013, en el artículo 88 el cual habla sobre un Plan para la gestión integral de residuos sólidos conocido como PGIRS.

Debido a todos estos problemas, la Alcaldía mayor de Bogotá, en el año 2016, dirigida por Enrique Peñalosa, generó una guía técnica para el aprovechamiento de todos estos residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. Allí retomaron el programa Basura cero, creado en el gobierno de Gustavo Petro, “el cual fue formulado para mitigar los efectos socio-ambientales del cambio climático, mediante el desarrollo de un esquema de gestión integral de residuos, con un componente fundamental de inclusión social de la población recicladora” [1]. “El modelo de aseo definido por el programa Basura Cero se fundamenta en los ejes del Plan de Desarrollo Bogotá Humana y en la perspectiva de la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS)” [1].

La Gestión Integral de Residuos Sólidos busca aprovechar al máximo todos los residuos, incorporando materiales al ciclo productivo o empleándolo en la generación de energía. Así mismo, el objetivo es reducir los residuos generados por la ciudad y manejarlos de manera sostenible donde se minimice los problemas ambientales y se cree un sistema de calidad. Por ende, el manejo de los residuos sólidos orgánicos se convierte en una prioridad para la gestión ambiental de la ciudad ya que busca mejorar la calidad de vida en Bogotá. Cabe resaltar que entre las alternativas para aprovechar los residuos orgánicos está el compostaje ya que todos estos materiales pueden degradarse y servir al medio ambiente si se hace un proceso adecuado [1].

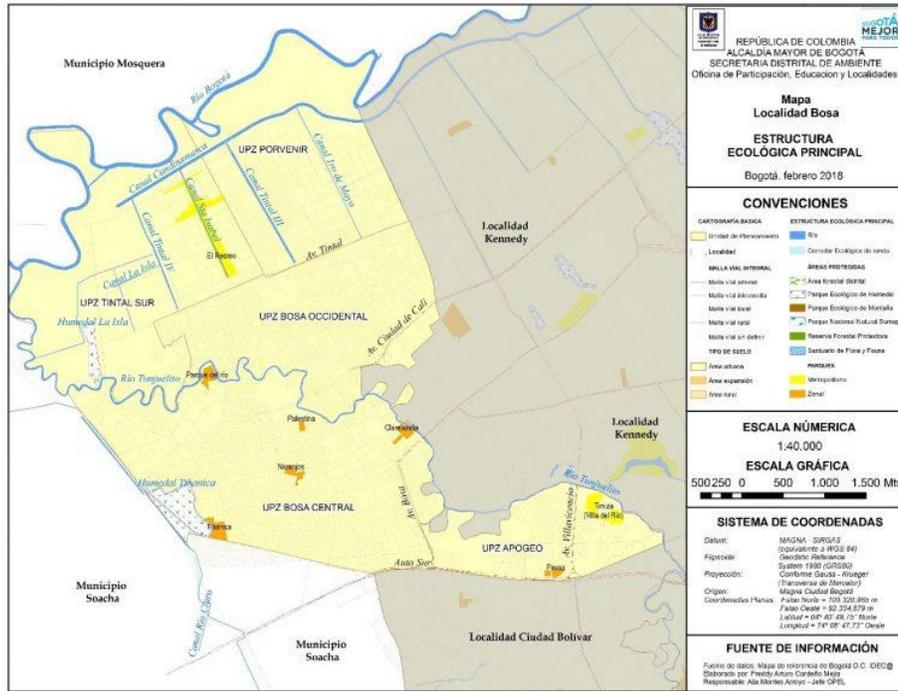
Por ende, “se elaboró esta guía teniendo en cuenta las condiciones actuales de la ciudad, tomando la temática ambiental como eje de cambio y mejoramiento” [1]. Es así como se espera de este modo fomentar el aprovechamiento de residuos orgánicos, involucrando a todos los habitantes y considerando que cada acción puede contribuir a transformar y mejorar el ambiente de la ciudad. Por lo que se busca mejorar cada uno de los parámetros que se han visto afectados por el mal manejo de estos residuos y cumplir los objetivos de desarrollo sostenible favoreciendo tanto al crecimiento de calidad en la ciudad y por ende en el país [1].

2.2 Información de la Localidad

El desarrollo del compostaje se lleva a cabo en la localidad de Bosa que se encuentra en la ciudad de Bogotá, lugar donde está localizado el Conjunto Residencial Camino de la Esperanza. La localidad de Bosa “Esta ubicada en el extremo suroccidente de la ciudad. Su extensión es de 2.466 hectáreas, correspondientes a un 2,87% del total del territorio del distrito” [36]. Limita con la localidad de Kennedy, Ciudad Bolívar y los municipios de Soacha y Mosquera. La Figura 16 muestra la división política de la localidad y sus límites. Cabe resaltar que, en Bogotá, durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 7°C a 19°C. El nivel de humedad percibido no varía considerablemente durante el año, y permanece prácticamente constante en 0% [37]

Figura 16

Localidad de Bosa y sus delimitaciones.



Nota. Esta figura muestra la localidad de Bosa y sus límites establecido por la alcaldía. Tomado de [38] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Bosa » Observatorio Ambiental de Bogotá.” <https://oab.ambientebogota.gov.co/localidades/bosa/> (accessed Apr. 17, 2022).

“El manejo y recolección de los residuos sólidos en Bogotá, se ha realizado en los últimos años a través de cuatro (4) operadores privados (Aguas de Bogotá, Lime, Ciudad Limpia, y Aseo Capital)” [39]. Estos operadores de limpieza están divididos por zonas y el prestador ciudad limpia lo comparten Bosa y Kennedy (zona 3).

En la Tabla 1 está representada la cantidad de residuos recolectados y transportados, producto de la recolección domiciliaria en toneladas hasta el RSDJ en el año 2020 según el Informe Plan Maestro Integral de Residuos Sólidos.

Tabla 1*Toneladas de residuos domiciliarios recolectados en Bogotá para el año 2020*

Año	Operador y Zona de Operación	Residuos Domiciliarios (t/año)
2020	ASE 1. Proambiental	430.466,79
	ASE 2. Lime S.A E.S.P	650.126,44
	ASE 3. Ciudad Limpia	401.555,37
	ASE 4. Bogotá Limpia	277.387,18
	ASE 5. Área Limpia	291.091,92
	Total	2.050.627,5

Nota: En la tabla se observan las toneladas de residuos domiciliarios recolectados y transportados hasta el RSDJ Periodo 2020. Tomado de [40] T. D. E. Contenido, “Informe Plan Maestro Integral de Residuos Sólidos – PMIRS 2020”.

El Plan de gestión integral de residuos sólidos en Bogotá del año 2020, define que la cantidad de residuos generados al año es de 3.125.364 de los cuales el 51,32% pertenece a residuos orgánicos [40]. La recolección y transporte de los residuos urbanos en zonas residenciales por parte de la empresa prestadora del servicio se realiza como mínimo tres veces a la semana y debe realizar algunas actividades como: Barrido general, limpieza y lavado de vías y áreas públicas, corte de césped y poda de árboles, estas actividades tienen un costo y dependen de las tarifas aplicadas por el operador de limpieza. En el año 2022 las tarifas manejadas por el operador ciudad limpia son: el costo de disposición final de residuos es de 39.008,07 pesos colombianos / tonelada, el costo de tratamiento de lixiviados es de 20.639,25 pesos colombianos y existe un costo al incentivo de aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos de 8.000 pesos colombianos /tonelada [41].

Para el año 2020 la alcaldía de Bogotá articuló un proyecto enfocado en la implementación de estrategias de cultura para la disposición adecuada de los residuos orgánicos y generar una viabilidad siguiendo los pasos de la economía circular. De esta manera el conjunto residencial puede aplicar a la opción de tarifa multiusuarios donde presentan de forma conjunta la cantidad

de residuos orgánicos generados a la empresa prestadora de servicios de aseo, así se pagará el servicio por la cantidad de residuos generados realmente. Por lo tanto, si el conjunto disminuye la producción de residuos mediante su aprovechamiento, el valor de facturación final se reducirá significativamente. Todo lo anterior cumpliendo con las resoluciones CRA No. 351 y 352 de 2005 donde se establece algunas condiciones para la recolección de residuos cuando se es afiliado a la opción multiusuarios [8].

2.3 Producción de residuos orgánicos en el Conjunto Residencial Camino de la Esperanza

La ubicación del proyecto es el Conjunto Residencial Camino De La Esperanza, ubicado en la zona suroeste de la localidad de Bosa en la dirección Carrera 79 A # 78-55 sur barrio San Diego. El conjunto tiene una extensión de 10.961,24 m² de los cuales el 15% pertenece a zonas verdes. Está conformado por 10 bloques de 24 apartamentos con una cantidad promedio de 4 personas por domicilio, dando un total de 960 habitantes en el conjunto, un salón comunal, un cuarto de basura, un BBQ y un área de parqueo.

En la Figura 17 se muestra la ubicación satelital del conjunto y en la Figura 18 se puede observar la conformación de un bloque y sus respectivos apartamentos evidenciando que estos cuentan con cuatro apartamentos por piso.

Para recolectar los residuos generados en el conjunto, se realiza una invitación por medio de una circular general ubicada en la portería a participar de un proyecto para la sostenibilidad del conjunto por medio de un sistema de compostaje de residuos orgánicos para la producción de abono orgánico, esta se puede observar en el Anexo # 1. Cada residente interesado debe firmar una planilla ubicando la torre y apartamento donde vive y la hora en la cual es posible la recolección de los residuos, en este punto se hace la aclaración de que los residuos que se deben recolectar son restos de frutas y vegetales. Los resultados de esta convocatoria permiten obtener una muestra a analizar de 43 apartamentos que corresponden al 18% aproximadamente del total de viviendas en el conjunto.

Otro material importante durante el proceso son los residuos de poda provenientes de las zonas verdes del conjunto, los cuales son recolectados por el personal del aseo una vez al mes y se retira aproximadamente 20 kg. Estos residuos fueron agregados para mejorar la humedad durante el proceso y se especificará en el capítulo 3.

Para conocer la cantidad de residuos orgánicos generados por los residentes del conjunto, es necesario pesar los residuos recolectados y almacenados por 2 días, en donde se obtuvo un peso total de 65,67 kg de residuos orgánicos y así un total de 5497,95 kg mensuales. Esta información nos es útil para calcular la producción per cápita de residuos, que es aquel que nos indica el comportamiento de la generación de residuos por los residentes.

Ecuación 1

Producción per capital de residuos

$$PPC = \frac{DSr}{Pob \times t}$$

Donde, PPC= Producción per cápita de residuos por cada persona diariamente (Kg/persona día), DSr=Cantidad de residuos sólidos recolectados en un tiempo determinado (Kilogramo/semana, Kilogramo/mes, etc), Pob= Población total (Número de habitantes) y t= Tiempo determinado para la cantidad de residuos (día, mes, año, etc) [44].

La unidad administrativa especial de servicios públicos de Bogotá para el año 2020 encontró que se producen 0,84 kg de residuos al día por persona [45]. El cálculo para los residuos generados en el conjunto para el per cápita es de 0,76 kg/persona al día. La comparación de estos datos se

ve afectada debido a que la recolección de residuos que se llevó a cabo en el conjunto fue de residuos sólidos orgánicos específicamente y no se tiene en cuenta los demás residuos generados por cada uno de los habitantes, este valor se puede validar ya que la producción per cápita de residuos orgánicos en Bogotá es de 0,63 kg/persona al día.

2.4 Caracterización de los residuos orgánicos residenciales

El compostaje es un proceso biológico que se realiza en condiciones aeróbicas donde ocurren actividades metabólicas por parte de algunos microorganismos. Las etapas del compostaje ocurren de manera adecuada cuando se garantizan las condiciones de humedad y la relación carbono-nitrógeno, es por esto que se hace una caracterización de los residuos determinando el valor de estas condiciones inicialmente que son de vital importancia para cada ajuste que se haga durante el proceso de transformación. En la Tabla 2 se observa los valores de relación C/N y humedad para algunos residuos orgánicos que sirven de referencia para dar inicio al proceso.

Tabla 2

Propiedades de la materia prima.

Materiales	Relación C/N	Contenido de humedad
Hojas secas	80/1	38%
Desechos de fruta	35/1	70%
Pasto verde cortado	19/1	15%
Desechos de cocina	15/1	70%

Nota: En la presente tabla se muestran las propiedades importantes al momento de realizar el proceso de compostaje. Tomado de [46] J. Flores, “Estudio de caracterización de los residuos sólidos,” *Munic. Dist. Las Lomas*, vol. 1, p. 104, 2009, [Online]. Available: http://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/elibros_internet/55777.pdf y [47] B. E. Tituaña Morocho, “ELABORACIÓN DE COMPOST MEDIANTE LA INOCULACIÓN DE TRES FUENTES DE MICROORGANISMOS A TRES DOSIS,” *Pap. Knowl. .*, vol. 7, no. 2, pp. 107–15, 2009.

Se evidencia que los residuos orgánicos de cocina tienen un valor de relación C/N de 15 y una humedad de 70%, a esto se suma que los restos de fruta y verdura tienen una relación C/N de 35

[46]. A los residuos sólidos orgánicos generados por las 48 personas del Conjunto Residencial Camino de la Esperanza se le debe realizar una caracterización físico química para conseguir una precisión elevada.

La caracterización de la materia prima se lleva a cabo por medio de la recolección de 300 gr de residuos orgánicos, haciendo uso de la técnica de cuarteo, ampliamente utilizada en el sector de alimentos para el control de calidad. Esta consiste en tomar la cantidad total de residuos sólidos (65,67 kg) dividir en 4 partes y descartar dos de estas, repitiendo el procedimiento hasta conseguir la muestra deseada, como se ve en la Figura 19.

Figura 19

Cuarteo de los residuos organicos.



Nota: En la presente figura se muestra el método de cuarteo que se utilizó para enviar uno de estos montos a la prueba de laboratorio, así conocer las propiedades iniciales de los residuos.

Esta muestra es analizada en el laboratorio AGRILAB, ubicado en Bogotá. Aquí se entrega la muestra de 300 gr resultante del cuarteo de 63,5 kg de residuos recolectados y almacenados por los habitantes del Conjunto residencial Camino de la esperanza. La muestra de residuos de poda no fue analizada y sus principales parámetros fueron asumidos por la teoría y experimentos ya realizados. Los resultados de la caracterización se muestran en la Tabla 3

Tabla 3

Resultados de laboratorio de los residuos sólidos.

VARIABLES	RESULTADOS
<i>Humedad (%)</i>	83,1
<i>pH</i>	5,69
<i>Cenizas</i>	3,40
<i>Carbono (%)</i>	5,17
<i>Nitrogeno (%)</i>	0,25
<i>Rel. C/N</i>	21

Nota: En esta tabla se observa los resultados que se obtuvieron de los residuos orgánicos residenciales enviados al laboratorio Agrilab para conocer si las propiedades son las adecuadas para empezar el proceso del compostaje. Certificado en el Anexo # 2

Los resultados de la caracterización muestran que la cantidad de humedad es de 83,1%, valor que está por encima del rango óptimo de humedad que es entre 40 y 60% [22], permitiendo un sistema aerobio para los microorganismos del proceso. La humedad de los residuos de poda es del 15%, valor que es muy bajo para la transformación de los residuos, es por esto que se debe hacer una mezcla entre los dos tipos de residuos para estabilizar el valor de humedad entre el requerido.

Por otro lado la relación C/N es una variable principal e importante en el proceso ya que de esta depende el crecimiento y la reproducción de los microorganismos que participan en el proceso; el valor adecuado para un buen compostaje se encuentra entre 15 y 35 [22]. El análisis del laboratorio obtuvo una relación C/N de 21, indicando que se encuentra entre el rango requerido, sin embargo, este valor muestra que hay un pequeño exceso de nitrógeno que podría generar

malos olores en el compostaje [22]. En cuanto a los residuos de poda, estos tienen una relación C/N de 19, es decir que es un material que está en el rango requerido y la mezcla que se va a generar no va a ser alterada significativamente en la relación C/N.

3. PROCESO DE COMPOSTAJE A NIVEL LABORATORIO

3.1 Selección del proceso de compostaje

En el proceso de compostaje existen varias técnicas para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, cada una está caracterizada por factores como requerimientos de clima, tipo de medio (aerobio o anaerobio), tiempo de compostaje, cantidad y tipo de material y la seguridad higiénica aplicada.

Para este proceso es conveniente trabajar en medio aerobio ya que contamos con un espacio pequeño y el sistema anaerobio requiere inversiones mayores y su metodología es compleja. Este tipo de compostaje se divide principalmente en sistemas abiertos que son aquellos que se pueden realizar al aire libre como pilas estáticas y dinámicas, y los sistemas cerrados que son los que se realizan bajo techo o en recipientes; estos son conocidos como reactores horizontales o verticales.

3.1.1 Pilas estáticas aireadas

Este tipo de sistema es usado ampliamente cuando hay una cantidad abundante y variada de residuos orgánicos. En este se deben colocar los residuos sobre una red de tuberías perforadas por donde atraviesa aire que ha sido aspirado o inyectado desde un ventilador. Este sistema elimina las condiciones anaeróbicas por medio de la inyección constante de aire que además puede ser controlado según sean las necesidades de los residuos [22], [48].

Figura 20

Pilas estáticas aireadas



Nota: En la figura se muestra la red de tuberías que se encuentra bajo este tipo de compostaje por donde pasa el aire para que se realice el proceso de la manera correcta. [49] “pilas estaticas aireadas.jpg (706×342).” <https://docplayer.es/docs-images/74/70045146/images/17-4.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).

3.1.2 Pila dinámica

Este tipo de sistema es caracterizado por ser económico en consumo de energía. Para esto se coloca el material en largas pilas o montones de 2 a 4 metros de altura. El tipo de aireación se hace por medio de volteos periódicos, comúnmente conocido como convección natural. Los volteos dependen de la humedad y la textura que vaya adquiriendo la mezcla [50].

Figura 21

Pila dinámica



Nota: En la figura se muestra el proceso de compostaje por pila dinámica. Tomado de [51] “pila dinamica.jpg (643×456).” <https://docplayer.es/docsimages/89/98232819/images/132-5.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).

3.1.3 Reactor vertical

En este tipo de compostaje el recipiente descansa sobre su base. Los residuos orgánicos se añaden por la parte superior del reactor y el material compostado se puede retirar por la parte inferior. Se conoce como método continuo estático porque el material orgánico entra de manera continua y el producto compostado es recolectado también continuamente por la parte inferior [22].

Figura 22

Reactor vertical



Nota: En la figura se muestra la construcción de un reactor vertical para realizar el compostaje. [52]“Compostador_de_jardín.jpg (4034×2678).” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Compostador_de_jardín.jpg (accessed Apr. 19, 2022).

3.1.4. Reactor horizontal

Es aquel donde el recipiente descansa sobre su eje longitudinal. Se le llama discontinuo porque es un proceso “por cargas”: una vez que el reactor es llenado con los residuos orgánicos, se debe dejar que el proceso finalice para extraer el material antes de introducir una cantidad de residuos. Este tipo de reactores puede estar estático o dinámico, es decir mantener el volteo manual o un mezclador interno que por lo general hace que gire en su propio eje constantemente

Figura 23

Reactor horizontal.



Nota: En la figura se muestra el diseño de un reactor horizontal para realizar el proceso de compostaje. Tomado de: [53] “Compostador-de-dos-pisos-con-bidones.jpg (640×367).” <https://ecoinventos.com/wp-content/uploads/2015/07/Compostador-de-dos-pisos-con-bidones.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).

Tabla 4

Ventajas y desventajas de los tipos de proceso.

TIPO DE PROCESO	COSTOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Pila estática aireada</i>	Costos de inversión altos	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere volteo manual. - Reducción de mano de obra 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento en equipos de aireación - El área de trabajo debe ser grande.
<i>Pila dinámica</i>	Costos de inversión altos	<ul style="list-style-type: none"> - Método económico en cuanto a consumo de energía - Control de humedad y compactación 	<ul style="list-style-type: none"> - El área de trabajo debe ser grande. - Riesgo de bolsas anaerobias.
	Costos de	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede ubicar en áreas pequeñas. - Mejor control de 	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de crear bolsas anaeróbicas. - El material tiende a

TIPO DE PROCESO	COSTOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Reactor vertical</i>	inversión bajos	lixiviados. - El producto compostado se puede retirar de manera continua.	compactarse por lo que la humedad no es uniforme.
<i>Reactor horizontal</i>	Costos de inversión bajos	- Se puede ubicar en áreas pequeñas y medianas. - Mejor distribución de la humedad. - Facilidad de volteo - Mayor control de lixiviados	- Mayor inversión que en el sistema vertical.

Nota: En la tabla se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de procesos para realizar el proceso de compostaje y permitir una elección adecuada para la parte experimental.

Para seleccionar el proceso que sea más adecuado para la propuesta presente, se debe tener en cuenta varios factores como los de la Tabla 4. Allí podemos observar que los procesos de pila estática y dinámica requieren costos de inversión altos por lo que se pueden descartar estas dos opciones. Respecto a la técnica de reactor vertical, esta maneja áreas de trabajo pequeñas, pero tiende a generar bolsas anaerobias y la humedad no suele ser uniforme. Es por esto que la mejor técnica para llevar a cabo el proceso de compostaje es el reactor horizontal, ya que se puede garantizar mejor distribución de la humedad, el volteo se puede hacer manual y aunque la inversión inicial es mayor que en el reactor vertical, para este caso se puede controlar las variables de proceso de manera rigurosa y continua.

3.2 Selección del tratamiento de lixiviados

Durante el proceso de compostaje es común que aparezca un líquido conocido como lixiviado que corresponde al agua que se drena por el exceso de humedad. Este líquido es necesario

aprovecharlo ya que es uno de los causantes de la contaminación en los rellenos sanitarios. Es por esto que se debe contemplar opciones de tratamiento que, aunque es un tema del que poco se ha investigado, existen algunas técnicas posibles para darle un uso adecuado a este subproducto. Hay cinco tratamientos principales que han dado como resultado biofertilizantes o biogás.

3.2.1. Tratamiento anaerobio

Consiste en la construcción de un Digestor anaerobio con el fin de obtener biogás por medio de microorganismos del mismo líquido lixiviado [54].

3.2.2. Tratamiento Aerobio

Se estudia el tiempo de residencia en un reactor con presencia de oxígeno con el fin de desarrollar microorganismos facultativos y aerobios para así tener la oportunidad de obtener biogás y a la vez fertilizante orgánico [54].

3.2.3. Almacenamiento

Recolectar el líquido y mantenerlo aislado de la luz. Esto se hace en recipientes de plástico o vidrio que garanticen poco contacto con el exterior. Cuando el lixiviado pertenece a un compost fresco, el líquido tiene color oscuro, pH ácido y mal olor. De esta manera es posible que se pueda usar como fertilizante [22].

3.2.4. Absorción.

El lixiviado recolectado se debe poner en contacto con carbón activado con el fin de que sean absorbidos los nutrientes fundamentales y tener dos soluciones, la primera es aprovechando el carbón como fertilizante y la segunda tratar el lixiviado para que pueda ser desechado de una manera más sencilla [55].

Sin embargo, existen otros tratamientos que se hacen en los rellenos sanitarios directamente como la recirculación, evaporación forzada, tratamientos biológicos, fisicoquímicos y con membranas [56].

3.2.5 Reinyección

El lixiviado recolectado de las pilas puede recircularse al proceso de compostaje siempre y cuando se desee mantener o aumentar entre los rangos establecidos la humedad y los nutrientes requeridos del proceso.

Para seleccionar el tratamiento más adecuado se debe tener en cuenta que el proceso está enfocado en aprovechar los residuos orgánicos del conjunto residencial. Es por esto que se debe descartar el tratamiento anaerobio y aerobio, ya que estos están enfocados en cantidades elevadas de lixiviado y requieren alto capital para ser ejecutados, mientras que el almacenamiento es económicamente viable y no requiere procesos biológicos complejos. Para este caso se debe elegir este, pensando en que las cantidades de lixiviado son pequeñas y se puede aprovechar como fertilizante orgánico. Y en dado caso que los reactores construidos que lleven el proceso necesiten mantener o aumentar sus propiedades como la humedad o los nutrientes se les puede aplicar el tratamiento de reinyección.

3.3 Desarrollo experimental

3.3.1 Adecuación del terreno

Para el desarrollo del proceso de compostaje, el Conjunto residencial Camino de la esperanza prestó una zona que antes era destinada para BBQ y se aisló con material plástico para evitar el contacto directo con la luz solar y la entrada de organismos externos a él, este espacio cuenta con una longitud de 2,30 m y un ancho de 1,65 m para un total de 3,795 metros cuadrados. Para que el proceso tenga un control general, este espacio no tiene contacto directo con los habitantes del

conjunto, ni animales a su alrededor, esto con el fin de mejorar la medición de variables sin que sean afectadas por factores externos.

3.3.2 Recolección de residuos

Para el desarrollo experimental se decidió recolectar los residuos orgánicos producidos en dos días por el 18 % del total de los apartamentos que conforman el conjunto. Para esto se ubicó una caneca con bolsa verde donde cada representante por casa de las seleccionadas deposita diariamente los residuos generados. La recolección de los residuos se realizó en dos días y la cantidad total de residuos orgánicos recolectados fue de 65,67 kg.

3.3.3 Diseño del reactor

Para el proceso de compostaje se usa una caneca de polietileno, la cual tiene amplios usos en la industria de detergentes, alimentos y productos de limpieza, de esta manera este material brinda resistencia a la presencia de ácidos, bacterias ajenas al proceso y a cualquier tipo de corrosión, es fácil y práctico de transportar. Además, este tipo de canecas son de bajo costo, bajo peso y buena estabilidad, por lo cual el tiempo de vida útil es largo. Para este proceso se utilizará una caneca de 55 galones que debe ser modificada para el desarrollo experimental.

Figura 24

Caneca de polietileno



Nota: En la figura se evidencia la caneca que es de material polietileno y se utilizara para realizar el reactor horizontal

Tabla 5

Medidas del reactor

MEDIDA	VALOR (m)
<i>Largo</i>	0,95
<i>Diámetro</i>	0,60

Nota: En la presente tabla se observan las medidas que de la respectiva caneca que se utilizo para la construcción del reactor.

El reactor horizontal se construirá con una caneca de polietileno de 55 galones (Figura 24) y las dimensiones se encuentran en la Tabla 5, a esta caneca se realizan orificios en el fondo para la salida de los líquidos lixiviados. La caneca debe llevar una puerta para revisar el proceso y tomar las respectivas mediciones, esta tiene unas dimensiones de 0,54 m de largo y 0,35 m de ancho. Para recolectar el líquido lixiviado se hace uso de 3 platones de plástico ubicados debajo del reactor.

Para el proceso de compostaje es necesario realizar volteo que permitan la oxigenación del material orgánico, ya que este es aerobio. Los volteos deben ser cuidadosos para no afectar la

temperatura del proceso. Para evitar que el volteo sea manual totalmente, se dispone de un tubo con las dimensiones de la Tabla 6, con el fin de favorecer la aireación en cada una de las fases del compostaje. Este tubo contiene perforaciones realizadas previamente permitiendo que el aire del ambiente circule por medio de él y se transfiera al interior del reactor, de esta manera controlar la humedad y la compactación durante el tiempo de residencia de los residuos.

Tabla 6

Medidas del tubo de aireación

MEDIDA	VALOR (m)
<i>Largo</i>	1,16
<i>Diámetro</i>	0,055

Nota: En la presente tabla se observa las medidas que tiene el tubo de aireación el cual permite el volteo y mejorar el sistema de aireación del proceso.

El tubo de aireación tiene como fin permitir que el reactor gire en su propio eje, es por esto que se debe incluir una base que sostenga el reactor. Para esta base se usó como material la madera, debido a su bajo costo y su facilidad de acceso, las medidas de esta base se encuentran en la Tabla 7 y se observa con claridad en la Figura 25. El reactor, el mecanismo de volteo y la base se encuentran en la Figura 26, este hace referencia al diseño final del reactor que se utilizó en el proceso.

Tabla 7

Medidas de la base del reactor

MEDIDA	VALOR (m)
<i>Largo</i>	1,10
<i>Alto</i>	0,65
<i>Ancho</i>	0,75

Nota: En la presente tabla se observan las medidas que se utilizaron para la base del reactor.

Figura 25

Base del reactor



Nota: En la figura se observa la base donde se puso el reactor para obtener la altura deseada

Figura 26

Reactor horizontal



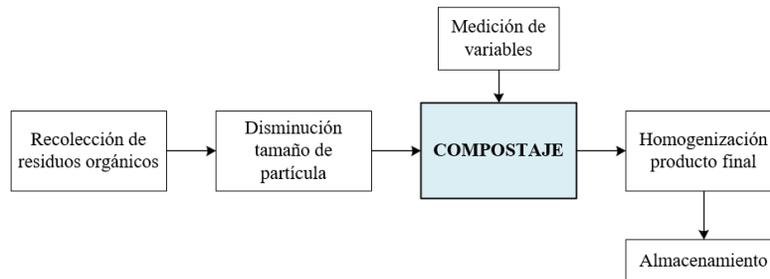
Nota: En la figura se observa el diseño final del reactor horizontal donde se realizará el proceso de compostaje.

3.3.4 Desarrollo experimental del compostaje

El proceso de compostaje se divide en varias etapas que se pueden observar en la Figura 27 que corresponde a un diagrama BFD del proceso.

Figura 27

Diagrama BFD del proceso de compostaje



Nota: En la figura se observa el diagrama BFD, el cual muestra las operaciones unitarias presentes en el procesos del compostaje.

3.3.4.a Recolección de los residuos orgánicos residenciales. Los residuos orgánicos son recolectados a partir de los 48 residentes del conjunto, que se mencionaron con anterioridad. De esta recolección se obtuvo 65,67 kg de residuos orgánicos en dos días, de los cuales se descartaron aproximadamente 2,12 kg que corresponden a residuos catalogados de difícil o larga descomposición como se observa en la Figura 28. Los residuos deben tener un pretratamiento donde se busca material contaminante como: papel, metal, plástico, etc, que se hubiera recolectado por error en el momento de selección y se separan del material orgánico.

Figura 28

Residuos orgánicos utilizados al inicio del proceso de compostaje.



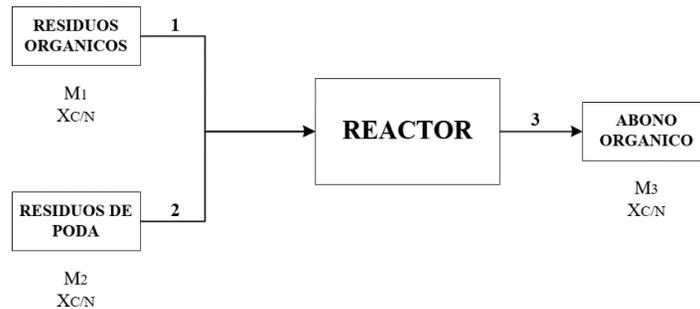
Nota: En la figura se pueden observar los residuos orgánicos al inicio del proceso del compostaje dentro del reactor.

3.3.4.b Disminución del tamaño de partícula. La velocidad de descomposición de los residuos orgánicos depende del tamaño que tiene el material inicialmente. Es por esto que disminuir el tamaño de partícula es fundamental, debido a que aumenta el área superficial y mejora notablemente la producción de microorganismos y por ende acelerar el proceso. Esta disminución se hace a partir de cortes manuales por dos razones, la primera es que la cantidad de residuos no es elevada y permite que se pueda hacer de manera rápida y sencilla, y la segunda es que no se cuenta con la maquinaria adecuada para la trituración de los residuos. Las dimensiones de los cortes deben estar entre 1 y 5 cm aproximadamente.

3.3.4.c Cantidad de residuos orgánicos iniciales. El proceso de compostaje debe tener una adición de residuos orgánicos y residuos de poda con un peso donde se tenga en cuenta que no se altere la relación C/N y la humedad, parámetros que repercuten en la calidad del abono. Para determinar el peso de la material inicial se debe realizar un balance de materia (Figura 29). En este punto se debe tener en cuenta que el reactor se debe llenar entre el 70 y 85% de su volumen.

Figura 29

Balance de materia



Nota: En la figura se observa el balance de materia del proceso para conocer el flujo masico total del abono al final del proceso.

El balance se realiza para conocer el peso inicial de los residuos orgánicos y los residuos de poda, teniendo en cuenta que la relación C/N tiene un rango óptimo de 15 a 35. El resultado del balance serán las cantidades de materia prima necesarias, sin afectar la proporción adecuada de C/N que permite la transformación correcta de los residuos. El peso de residuos orgánicos y los

residuos de poda necesarios para el reactor se muestran en la Tabla 8. El balance desarrollado con sus respectivas ecuaciones se encuentra en el Anexo 3.

La siguiente ecuación representa la relación Carbono-Nitrógeno del proceso inicial, resultado del balance de materia.

Ecuación 2

Relación carbono - nitrógeno del proceso inicial

$$R = \frac{M_1 * C_1 + M_2 * C_2}{M_1 * N_1 + M_2 * N_2}$$

Donde

M1: Cantidad de residuos orgánicos

C1: Porcentaje de carbono para los residuos orgánicos

N1: Porcentaje de nitrógeno para los residuos orgánicos

M2: Cantidad de residuos de poda

C2: Porcentaje de carbono para los residuos de poda

N2: Porcentaje de nitrógeno para los residuos de poda

Tabla 8

Peso de los residuos

MATERIAL	CANTIDAD (KG)
Residuos orgánicos	63,5
Residuos de poda	10

Nota: En la presente tabla se observa el peso de los residuos que se utilizaron para el proceso de compostaje.

3.3.4.d Monitoreo de variables de proceso. Después de dar inicio al proceso de compostaje, se debe hacer un monitoreo de variables para llevar un control de las etapas del proceso y prevenir o corregir posibles inconvenientes a lo largo del desarrollo. Las variables que se deben medir son:

Temperatura. Es la primera medición que se debe realizar, para evitar que haya errores debido al contacto con el ambiente. El control de esta variable se hace con un termohigrómetro multifuncional que mide rangos de temperatura entre 10 y 100 °C. Se hace toma en tres partes del reactor, izquierda, derecha y centro, esto con el fin de mejorar la precisión y hacer un promedio de los tres valores. Para hacer esta toma se debe higienizar el termómetro realizando un lavado y secado, y luego se debe verificar que se encuentre a temperatura ambiente antes de hacer la medición inicial.

pH. Esta variable es tomada insertando el medidor multifuncional en tres puntos del reactor, izquierda, derecha y centro, realizando un promedio entre estos valores. Para medir el pH se debe hacer un lavado y secado del instrumento antes de hacer la medición.

Humedad. El control de humedad se hace desde dos técnicas, la primera es con el medidor multifuncional que mide la humedad en rangos (Dry +, Dry, Nor, Wet, Wet +), los valores aproximados para esta medición se observan en la Tabla 9. Y la segunda técnica es la prueba del puño, la cual consiste en agregar una cantidad de material del centro del reactor en el puño de la mano y aplicar fuerza apretando, lo normal del brazo, si aparece un goteo constante de agua indica que está por encima del 70%, si el goteo es intermitente está entre 60 y 70%, si no se observa goteo y el material no se compacta está alrededor de 50%.

Tabla 9

Medidas de humedad

MEDIDA	VALOR APROXIMADO
Dry +	20%
Dry	30-45%
Nor	50%

MEDIDA	VALOR APROXIMADO
Wet	60-75%
Wet +	80%

Nota: En la tabla se muestran las medidas que trae el equipo que se está usando para la medición de la humedad y al frente el valor aproximado que se le dio.

Aireación. Esta variable es conocida como volteo, no es medible, sin embargo, es de vital importancia para modificar procesos que no son deseados, acelerar la descomposición de los residuos y controlar la humedad en el reactor. La aireación ocurre gracias al tubo instalado en medio del reactor y se realizan volteos una vez por semana para obtener un producto heterogéneo con buena humedad y temperatura adecuada.

El medidor multifuncional de suelos que permite la toma de temperatura, humedad, pH y la intensidad de luz solar se encuentra en la Figura 30.

Figura 30

Medidor Multifuncional de suelos



Nota: En la figura se puede observar el equipo que se utilizó para el control de las variables más importantes en el proceso del compostaje.

3.3.4.e Almacenamiento del producto final. El compost finalizando el proceso, cambia sus propiedades fisicoquímicas convirtiéndose en material granulométrico y la temperatura en el reactor se vuelve constante, se conoce como abono orgánico. Para esto se realizan volteos que homogenizan el material, se hace un secado, se hace un tamizado para retirar residuos y se empaca en bolsas herméticas de 1 kg y se mantienen en un lugar fresco y seco.

3.3.5 Desarrollo del tratamiento para lixiviados

Durante el compostaje la humedad del proceso tuvo que ser disminuida, ya que este parámetro cuando está en exceso es el que genera el líquido lixiviado. Este es aprovechable usando varias técnicas que ya fueron mencionadas, en este caso se debe almacenar este líquido en recipientes de vidrio o plástico y mantenerlo alejado de la luz solar. La cantidad de lixiviado generada durante el proceso fue de 1,5L, cantidad que se vio afectada por el exceso de humedad, este líquido se puede usar inmediatamente siempre y cuando tenga un color oscuro, su pH sea ácido y su olor sea desagradable.

Se debe controlar la disposición final para el líquido lixiviado ya que por su composición no es fácil de desechar. El conjunto residencial tiene la posibilidad de poner en contacto este líquido con carbón activado y aprovechar su capacidad de absorción aumentando la capacidad del carbón como fertilizante, sin embargo, antes de hacer este procedimiento se deben hacer estudios preliminares que indiquen la cantidad exacta de carbón para su aprovechamiento.

3.4 Resultados y discusión del proceso de compostaje

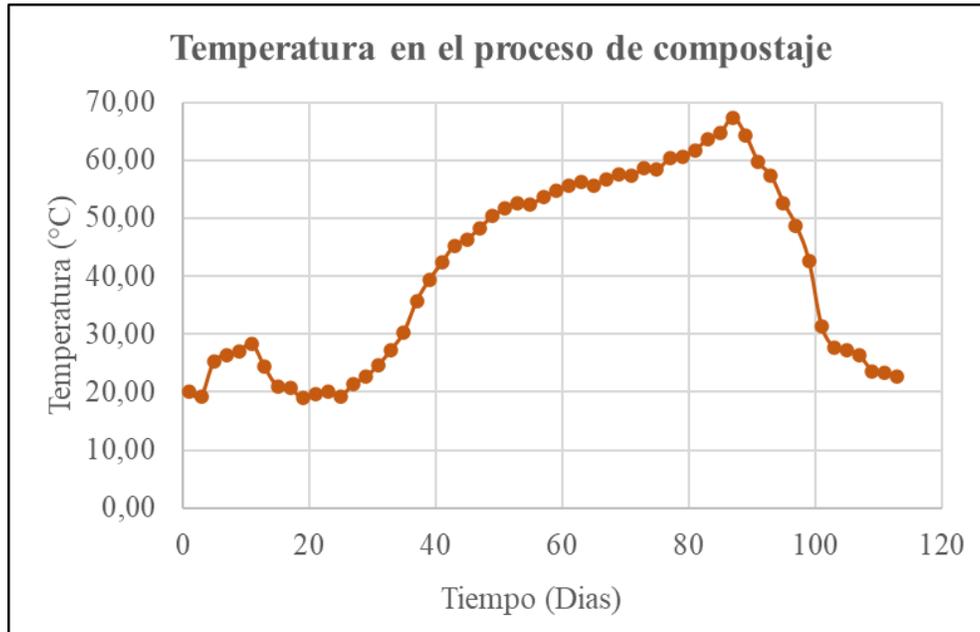
Este capítulo muestra los resultados obtenidos durante el proceso de compostaje y se discuten las variables que fueron medidas durante el tiempo que se descompuso el material orgánico, permitiendo la obtención de un producto de calidad y homogéneamente estable.

3.4.1 Temperatura

La temperatura es una variable fundamental en el proceso de compostaje, ya que nos indica en que etapa del proceso nos encontramos, ya sea la fase mesófila, termófila o de maduración. Este parámetro puede significar la inhibición de microorganismos con el aumento de la temperatura y se debe garantizar que no se alteren las propiedades del abono orgánico al final. El comportamiento de la temperatura a lo largo del compostaje se puede observar en la Figura 31. Los resultados obtenidos se observan en el anexo 4.

Figura 31

Grafica de temperatura vs el número de mediciones.



Nota: En la presente grafica se puede observar el comportamiento de la temperatura con respecto al número de mediciones tomadas durante todo el proceso del compostaje.

La temperatura inicial de los residuos orgánicos en el reactor es de 20 °C, temperatura ambiente para todo el sistema. A los 5 días se observa un aumento de temperatura leve de 20°C a 25°C, llegando hasta los 28 °C en una semana y media. Posteriormente la temperatura empieza a disminuir desde los 28°C hasta 21°C. Se observa que el comportamiento no es normal y se da espera a que la actividad microbiana se estabilice sin intervención. Sin embargo, la temperatura disminuye y se mantiene constante entre 19°C y 20°C por 12 días, esto se debe a un aumento en

la humedad dentro del reactor, ya que existe una deficiencia en residuos secos. Es por esto que el día 25 se realiza la adición de residuos de poda con el fin de disminuir la humedad en el reactor, activar el proceso y aumentar los niveles de temperatura. Para la semana 4 y 5 la actividad microbiana tiene un aumento, confirmando que hay presencia de bacterias mesófilas, aquellas que realizan la degradación de los residuos orgánicos durante 25 días desde el inicio del compostaje, y 18 días después de la adición de residuos de poda. La temperatura máxima de esta fase fue de 45,33 °C y se observa el crecimiento de moscas de la fruta o moscas de vinagre, aquellas que se alimentan de frutas en descomposición.

La fase termófila da su inicio en la semana 7, y en el día 87 se consigue un aumento de temperatura que alcanza los 67 °C. En esta fase se debe realizar volteo cuando hay temperaturas por encima de los 65 °C para evitar que esta sobrepase los 70 °C, ya que por encima de esta temperatura los microorganismos empiezan a degradarse y se detiene el proceso. En este punto el material orgánico pierde su aspecto original y el volumen de los residuos disminuye, y se conoce como etapa de higienización ya que la temperatura alta contribuye a destruir cualquier contaminante biológico. En esta etapa no hay presencia de moscas, ni otro tipo de organismo externo, pero si es notable como las propiedades fisicoquímicas como el color y el volumen cambian, como se observa en la Figura 32. La duración de esta fase fue de 44 días.

Figura 32

Cambio de las propiedades fisicoquímicas de los residuos orgánicos.



Nota: En la figura se puede observar cómo los residuos orgánicos van perdiendo sus propiedades fisicoquímicas.

Desde el día 89 en adelante se empieza a disminuir la temperatura y se evidencia un máximo de 30 °C para esta fase. Este enfriamiento ocurre en 20 días y durante este tiempo se hace un volteo semanal para homogenizar el producto y mejorar sus propiedades físicas, llegando a un abono orgánico homogéneo. En la semana 16 ocurre el proceso de maduración, donde la temperatura se mantiene constante entre 22 °C y 23 °C indicando que el proceso está llegando a su final. Las propiedades fisicoquímicas del abono final presentan un olor neutro parecido al de la tierra, color café oscuro, es ligeramente húmedo y su volumen es uniforme. Esta fase de maduración ocurre en 6 días y se obtiene un total de 88 días después de agregar los residuos de poda y 113 días desde el inicio del compostaje.

3.4.2 Humedad

El compostaje es un proceso biológico donde la presencia de agua es indispensable para las necesidades fisiológicas de los microorganismos. Se inicia el proceso con una humedad alrededor de 50%, parámetro que se encuentra entre el rango especificado para cumplir con lo mencionado anteriormente. En los primeros 11 días se obtiene una humedad que no supera el 50% dando como resultado un aumento en la temperatura y actividad microbiológica activa en el reactor, sin embargo, a partir de ahí hasta el día 25 la humedad aumentó hasta casi un 80% generando una disminución en la temperatura y el detenimiento de la actividad microbiana.

Para aumentar la temperatura de nuevo y reactivar la transformación de los residuos orgánicos, se realiza la adición de residuos de poda hasta obtener una disminución en la humedad entre el 40% y 60%, manteniendo esta variable constante hasta el final del proceso apoyada en los volteos que permiten la aireación. Los resultados obtenidos de este parámetro se encuentran en el Anexo 4.

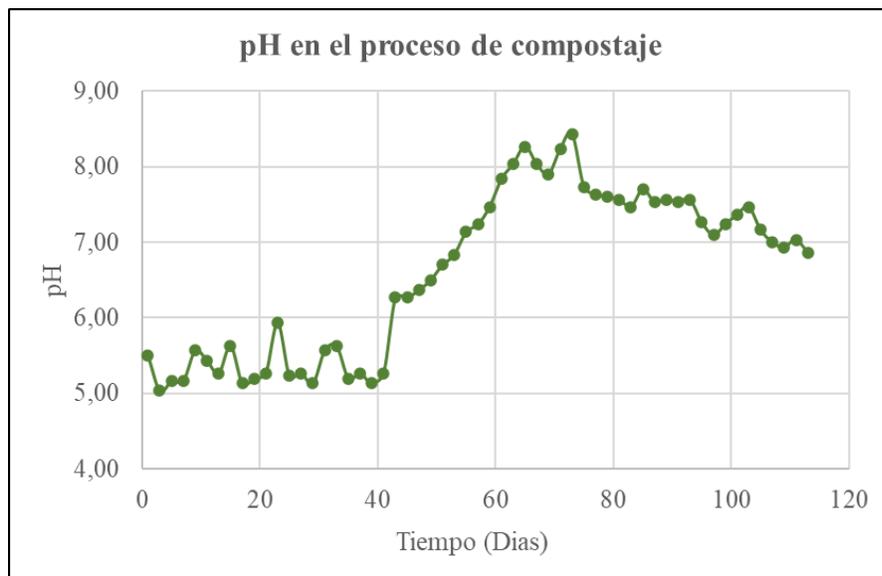
3.4.3 pH

La medición inicial registrada fue de 7, demostrando que los residuos se encuentran en su composición normal. El primer mes de proceso el material orgánico se descompone formando ácidos orgánicos y el pH se encuentra entre 5 y 6. Luego cuando se da inicio a la fase termófila

se genera amoníaco en el sistema, alcalinizando el medio, dando un aumento de pH por encima de 6. Finalmente, cuando se da el enfriamiento y la maduración el valor del pH se mantiene cercano al neutro (entre 6,8 y 7,2). Los valores óptimos para un buen compostaje se encuentran en un rango de 5,8 a 7,2. Teniendo en cuenta que para este rango se garantiza alta actividad bacteriana y fúngica al mismo tiempo. Estos resultados se pueden observar en la Figura 33. Los resultados obtenidos se observan en el anexo 4.

Figura 33

Grafica del pH con respecto al número de mediciones



Nota: En la presente grafica se observa el comportamiento del pH con respecto al número de mediciones tomadas durante todo el proceso del compostaje.

3.4.4 Abono orgánico

Después de 113 días se obtiene un compostaje homogéneo y estable, y las propiedades fisicoquímicas adecuadas, color café oscuro, olor grato a tierra. Se obtienen 31,7 kg de abono orgánico, aproximadamente la mitad del peso inicial de los residuos orgánicos residenciales aprovechables como se puede observar en la Figura 34

Figura 34

Abono orgánico



Nota: En la figura se observa los resultados que se obtuvieron en el proceso del compostaje.

Este producto debe ser analizado para conocer sus propiedades fisicoquímicas finales, para esto se realiza una muestra del material obtenido en el reactor, la cual paso por un último proceso de secado y tamizado ya que aún tenía rastros de cascara de huevo y de residuos de poda. En seguida se llevó al laboratorio donde se analizaron los siguientes parámetros: potasio, fósforo, hierro, pH, carbono total, nitrógeno total y humedad realizado en el Laboratorio de aguas y suelos de la Universidad Nacional. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10. Certificado en el Anexo 5.

Tabla 10

Resultado del laboratorio del abono orgánico

Propiedades	Abono por compostaje	NTC - 5167	Unidades
<i>Relación C/N</i>	7,86	<20	-
<i>Fosforo</i>	0,99	>0,5	%
<i>Potasio</i>	0,91	>1	%

Propiedades	Abono por compostaje	NTC - 5167	Unidades
<i>Hierro</i>	3772	-	mg/kg
<i>Humedad</i>	31,2	<35	%
<i>pH</i>	6,53	>4 y <9	-

Nota: En la tabla se observa una comparación de los resultados obtenidos del abono realizado por compostaje, el cual se analizó en un laboratorio, frente a la normativa que presente el gobierno con los parámetros indicados para un abono.

Como se puede observar en la Tabla 10 los resultados obtenidos del abono fueron comparados con la norma NTC 5167, la cual establece los rangos en los que se deben encontrar cada uno de los parámetros para catalogar el abono como un fertilizante orgánico apto para usar. En esta se comprueba que el producto obtenido cumple con los requisitos establecidos, sin embargo, el potasio se encuentra por debajo del límite mínimo, esto se debe a que los residuos utilizados en su gran mayoría eran vegetales los cuales no tienen gran cantidad de potasio en su composición, como si lo tienen las frutas. Por lo que se estima que este nutriente aumente su valor cuando se realice la inclusión de los microorganismos que se le está sugiriendo al conjunto ya que alguno de estos tiene buena captación de potasio que beneficia al producto final.

3.5 Soluciones a los posibles problemas en las variables del proceso

Durante el proceso de compostaje es posible que ocurran inconvenientes con algunas variables del proceso, en algunos casos estas se encuentran deficientes y en otros en exceso. Es por esto que se deben controlar con el fin de favorecer el proceso y que no se inactive la actividad microbiana que hay en él. En esta sección se recolectan los posibles problemas en los parámetros principales del proceso de compostaje y sus soluciones.

3.5.1 Temperatura.

Tabla 11

Problemas y soluciones presentados en el manejo de la temperatura

PROBLEMA	CAUSA		SOLUCIONES
Baja temperatura ($T < 35^{\circ}\text{C}$)	Humedad insuficiente	Los microorganismos disminuyen su actividad metabólica debido a que la humedad es demasiado baja	Agregar residuos orgánicos frescos con mayor humedad o hidratar el material orgánico.
	Baja relación carbono nitrógeno	Los microorganismos generan enzimas a partir del Nitrógeno, cuando este no es suficiente la actividad se ralentiza y la temperatura aumenta lentamente	Adicionar residuos orgánicos con alto contenido de Nitrógeno como césped o algunos restos de frutas y verduras
Altas temperaturas ($T > 70^{\circ}\text{C}$)	Oxigenación y humedad insuficiente	A una temperatura elevada los microorganismos se descomponen y se inhibe el proceso. Los microorganismos termófilos siguen en el proceso, pero no se facilita la activación de los mesófilos para terminar el proceso.	Realizar volteos revisando la temperatura del sistema y verificar que la humedad este entre 40% - 60%. Realizar la adición de residuos orgánicos con contenido de carbono para que haya lenta degradación como ramas gruesas, papel o cartón, viruta de madera.

Nota: En la presente tabla se observan los problemas y posibles soluciones que se pueden presentar en el proceso de compostaje con respecto a la temperatura. Tomado de [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

3.5.2. Humedad:

Tabla 12

Problemas y soluciones presentados en el manejo de la humedad

PROBLEMA	CAUSA		SOLUCIÓN
Humedad <40%	Humedad insuficiente	El proceso se ve detenido por la ausencia de agua para los microorganismos	Se debe aumentar la humedad rociando agua al proceso o adicionando residuos orgánicos frescos como restos de fruta (contenido de agua elevado)
Humedad >60%	Oxigenación insuficiente	Los residuos orgánicos están muy húmedos y se crean zonas anaerobias debido al desplazamiento del oxígeno	Realizar volteo al material y/o agregar residuos orgánicos con alto contenido de carbono como aserrín, poda u hojas secas (bajo contenido de humedad)

Nota: En la presente tabla se observan los problemas y posibles soluciones que se pueden presentar en el proceso de compostaje con respecto a la humedad. Tomado de [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

3.5.3 pH:

Tabla 13

Problemas y soluciones presentados en el manejo del pH

PROBLEMA	CAUSA		SOLUCIÓN
pH <4,5	Exceso de ácidos orgánicos	El material vegetal se encuentra en exceso liberando ácidos orgánicos que disminuyen el pH del medio	Se debe mejorar la relación C/N de modo que el material vegetal se vea obstruido por un aumento en la alcalinidad (agregar restos de fruta)
pH >8,5	Exceso de Nitrógeno	Se genera una deficiencia en la relación C/N, que aumenta la temperatura y se produce amoníaco (alcalinización del medio)	Agregar residuos secos como residuos de poda, virutas de madera, ramas gruesas u hojas secas. (alto contenido de carbono)

Nota: En la presente tabla se observan los problemas y posibles soluciones que se pueden presentar en el proceso de compostaje con respecto al pH. Tomado de [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

3.5.4 Relación Carbono/Nitrógeno

Tabla 14

Problemas y soluciones presentados en el manejo de la relación C/N

PROBLEMA	CAUSA		SOLUCIÓN
Relación C/N > 35:1	Exceso de Carbono	Cuando el material orgánico tiene una cantidad elevada de residuos ricos en carbono, la temperatura del sistema disminuye y se ralentiza la descomposición	Agregar residuos con alto contenido de nitrógeno como: Estiércol de aves, Césped, Posos de café, Restos de frutas y verduras.
Relación C/N < 15:1	Exceso de Nitrógeno	El material orgánico tiene una cantidad elevada de residuos ricos en nitrógeno, causando el aumento de la temperatura del sistema y genera malos olores por el amoníaco.	Adicionar material con alto contenido de carbono como: Ramas gruesas, Serrín, Papel/cartón, Virutas de madera, Cortezas, Paja, Agujas de pino, Hojas de haya y roble.

Nota: En la presente tabla se observan los problemas y posibles soluciones que se pueden presentar en el proceso de compostaje con respecto a la relación C/N. Tomado de [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

3.5.5 Aireación:

Tabla 15

Problemas y soluciones presentados en el manejo de la aireación

PROBLEMA	CAUSA		SOLUCIÓN
Porcentaje de aireación < 5%	Baja aireación	Se genera un exceso de humedad y se crean bolsas anaerobias	Se debe realizar volteo continuo mientras se estabiliza la humedad
Porcentaje de aireación > 15%	Exceso de aireación	La cantidad de agua en el sistema desciende, la temperatura disminuye y el proceso de descomposición se detiene	Disminuir el tamaño de partícula para que haya menos espacio entre sí. Se debe agregar material fresco que aumente la humedad o rociar agua al sistema.

Nota: En la presente tabla se observan los problemas y posibles soluciones que se pueden presentar en el proceso de compostaje con respecto a la aireación. Tomado de [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

4. MICROORGANISMOS PARA ACELERAR EL PROCESO DE COMPOSTAJE

4.1 Contextualización de los microorganismos en el proceso de compostaje.

Para llevar a cabo el proceso de compostaje es necesaria la activación de algunos microorganismos que intervienen en la descomposición de los residuos orgánicos, por lo que la aparición de estos depende de las condiciones en las que se encuentre el sistema (temperatura, aireación y humedad). Los grupos más comunes de microorganismo presentes en el proceso son las bacterias, los hongos y las actinobacterias, las cuales tienen la función de degradar los compuestos complejos en carbohidratos, lípidos y proteínas impidiendo el crecimiento de ciertas enzimas que pueden llegar a hidrolizar la materia prima [57].

Las poblaciones microbianas van variando a otras que se adapten mejor en el sistema según cambien las condiciones, cada uno de estos a una duración de vida limitada. El grupo más importante presente en el proceso son las bacterias ya que éstas representan entre el 80% y el 90% de los microorganismos que crecen en el compost [58]. En este grupo se encuentran dos tipos de bacterias: las bacterias ácido lácticas, las cuales cumplen la función de producir ácidos lácticos que permiten degradar la materia orgánica en azúcares y carbohidratos ayudando a acelerar la descomposición de los residuos, también se encuentran las bacterias fotosintéticas las cuales sintetizan sustancias a partir de las secreciones de la materia orgánica, raíces y gases nocivos (amoníaco y sulfuro de hidrógeno) usando la luz solar y el calor del suelo como fuente de energía [59][60]. Por último, se encuentran las levaduras, las cuales se encargan de transformar los residuos orgánicos a partir de aminoácidos y carbohidratos que sirvan como sustratos para los demás microorganismos presentes en la fase del compostaje [60].

En cuanto a la participación de los actinomicetos es relevante ya que tiene capacidad enzimática para degradar los compuestos orgánicos complejos como la celulosa o lignina [58]. Se caracterizan por producir metabolitos con actividad antimicrobiana, incluyendo biocontrol de fitopatógenos [61]. Estos microorganismos se desarrollan en tasas inferiores comparadas con las bacterias y hongos por lo que son ineficientes en altos niveles de nutrientes. Por último, están los hongos filamentosos los cuales se caracterizan en la degradación aeróbica de los residuos ya que tienen alta capacidad lignocelulolítica [58].

Con el tiempo se han buscado alternativas para acelerar el proceso del compostaje, ya que como bien se sabe, el tiempo de descomposición y maduración de los residuos esta entre 10 a 16 semanas. Uno de estos métodos es la adición de microorganismos durante el proceso que permita disminuir el tiempo de elaboración del abono buscando mantener la calidad del producto y mejorar las características finales del mismo. En la mayoría de los casos se inoculan microorganismos que permitan la síntesis de enzimas hidrolíticas bajo diferentes condiciones presentes en los parámetros del proceso como la temperatura y el pH, logrando que se acelere el proceso, a esto se le conoce como bioaumentación [62].

Por esta razón se ha escogido estudiar ciertos microorganismos que favorezcan a la aceleración del proceso de compostaje en el conjunto residencial como una propuesta adicional para optimizar el tiempo entre la recolección de los residuos y el tiempo de residencia de estos en el reactor, así se obtendrá el producto en menor tiempo favoreciendo la cantidad de abono producido y sus características.

4.2. Estudio de microorganismos utilizados para acelerar el proceso de compostaje

A continuación, se busca estudiar 20 documentos en los que se haya implementado al compostaje una inoculación de microorganismos para conocer el comportamiento de estos durante el proceso y el producto final. Para ello, se busca en diferentes bases de datos bibliográficas como Google Academic, Ebsco Host, Scopus, Science Direct y Springer Link en donde con palabras claves en inglés y español, como inoculación, adición de microorganismo, aceleración del proceso de compostaje, microorganismos efectivos, influencia de microorganismos en el proceso de compostaje, se encontraron los siguientes artículos evidenciados en la Tabla 16

Tabla 16

Artículos con adición de microorganismos al proceso de compostaje.

No.	Sustrato	Masa de residuos	T amb (°C)	pH	Rel C/N	Microorganismos inoculados	Tipo de m/mo	Escala	Volteo	Duración	Ref.
1	Residuos sólidos urbanos	160 kg	25	Medio ácido	30	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> y <i>Aspergillus fumigatus</i>	Dos bacterias, un hongo	Pila	Una vez por semana	La inoculación de microorganismo permitió una disminución de 24 semanas a 20 semanas	[63]
2	Residuos de cocina, pasto seco y aserrín con excremento bovino y equino	2,95 Ton	19	5,5	30	<i>Streptomyces sp</i> , <i>Lactobacillus sp</i> y <i>Aspergillus niger</i>	Dos bacterias, un hongo	Pilas de 1,5 m de altura	Cada 8 a 15 días	El proceso de degradación duro 35 días	[64]
3	Lodo residual y paja de maíz	15 kg	21	6,2	25	<i>B. licheniformis</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>B. thermoamylovorans</i> , <i>B. thermoruber</i> y <i>B. hisashii</i>	Cinco bacterias	Reactor en caneca	Una vez por día	La degradación de los residuos demora de 7-14 días	[65]
4	Desechos sólidos municipales	1 tonelada	38	6,9	-	<i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma reesei</i> <i>Aspergillus niger</i> y <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	Tres bacterias, dos hongos y una levadura	Pila	-	La degradación pasa de 90 días a un promedio de 60 a 80 días.	[66]
5	Desecho de frutas, desechos vegetales, hojas, heno, periódico, paja de trigo y cascarilla de arroz	140 gr	30	5,0	25	<i>Bacillus subtilis</i> B1U/1, <i>Bacillus subtilis</i> D3L/1 y <i>Pseudomonas sp.</i> RAT/5	Tres bacterias	Pila	-	El proceso se monitoreo por 6 meses. El proceso de compostaje duro 120 días.	[67]
6	Pulpa de café	150 kg	27	-	20	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Citrobacter koseri</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Stenotrophomona maltophilia</i> , <i>Cromobacterium spp.</i> <i>Pseudomonas spp.</i>	Siete bacterias	Pila	Volteo días 1,10,20, 30 del proceso	Disminuyo de 150 días a 40 días	[68]

No.	Sustrato	Masa de residuos	T amb (°C)	pH	Rel C/N	Microorganismos inoculados	Tipo de m/mo	Escala	Volteo	Duración	Ref.
7	Estiércol fresco de ganado y paja de arroz	220 kg	23	7,8	10	<i>Dos Bacillus licheniformis, tres Bacillus megaterium, Bacillus thuringiensis, Bacillus subtilis, Bacillus amyloliquefaciens, Cellulosimicrobium funkei, Cellulomonas sp, Thermomonospora sp y Streptomyces s.p</i>	Doce bacterias	Caja de compostaje estática aireada	Una vez cada 7 días	El compostaje sin la inclusión dura 22 días y con la inoculación dura 28 días, sin embargo, el proceso aporta valor como fuente alternativa de nutrientes y promueve la madurez del compostaje.	[69]
8	Estiércol de oveja, torta sólida y tierra.	120 kg	18	-	30	<i>Escherichia sp, Enterococcus sp, Streptomyces sp.</i>	Tres bacterias	Pila	-	El proceso de compostaje con la inclusión de microorganismo duro 14 días	[70]
9	Residuo de cosecha de tomate, pasto kikuyo, salvado de trigo y cascarilla de arroz	175 kg	21	-	30	<i>E. coli y Salmonella sp.</i>	Dos bacterias	Pila	Una vez por semana	El proceso duro 78 días con la inoculación, sin ella duro 91 días.	[71]
10	Residuos sólidos municipales	5 kg	35	-	20	<i>Phanerochaete chrysosporium y Trichoderma reesei</i>	Una bacteria y un hongo	Pila	Por aireación	El proceso duro 21 días	[72]
11	Residuos sólidos, aserrín y estiércol de caballo.	110 kg	32	6,7	15	<i>Lactobacillus casei, Rhodospseudomona sp y Saccharomyces cerevisiae.</i>	Dos bacterias, una levadura.	Pila	-	El proceso duro 44 días	[73]
12	Residuos de planta de pimiento, residuo de almazara, cascara de almendra, residuos de poda y paja de arroz	400 kg	36	6,5	18	<i>Bacillus shackletonni y Streptomyces termovulgaris U. thermosphaericus</i>	Tres bacterias	Pila	Cada 15 días	El proceso duro 180 días	[74]

No.	Sustrato	Masa de residuos	T amb (°C)	pH	Rel C/N	Microorganismos inoculados	Tipo de m/mo	Escala	Volteo	Duración	Ref.
13	Paja de trigo	5 kg	35	-	43	<i>Pleurotus sajor – caju, Trichoderma harzianum, Aspergillus niger y Azotobacter chroococccum</i>	Tres hongos, una bacteria	Pozos	-	El proceso duro 40 días	[75]
14	Lodo prensado, bagazo y caña de azúcar.	60 kg	33	-	-	<i>Pleurotus sajorcaju, Trichoderma viridae, Aspergillus niger y Pseudomonas striatum</i>	Tres hongos, una bacteria	Pozos	-	El proceso duro 20 días	[76]
15	Paja de arroz y estiércol de vaca	24 kg	15	7,2	32	<i>Aspergillus niger, Penicillium commune</i>	Dos hongos	Reactor	-	El proceso duro 54 días.	[77]
16	Residuos sólidos municipales	600 kg	21	6,8	25	<i>Bacillus azotofixams, Bacillus megaterium, Bacillus mucilaginosus, Trichoderma koningii y Streptomyces cellulosa</i>	Cuatro bacterias, un hongos	Reactor	Una vez por día	El proceso duro 30 días	[78]
17	Estiércol de ganado y hojas de caña de azúcar	25 Kg	24	-	30	<i>Bacillus licheniformis, Aspergillus nidulands, Aspergillus oryzae</i>	Una bacteria, dos hongos	Reactor	Volteo días 8,14,17, 25, 30	El proceso duro 45 días	[79]
18	Paja de arroz y estiércol de ganado	368 Kg	13	-	35.8	<i>Bacillus licheniformis, Bacillus sonorensis</i>	Dos bacterias	Pila	Volteo los días 1,23, 45, 59,80	El proceso duro 117 días	[80]
19	Residuo banano y aserrín	130 kg	34	-	25.6	<i>Streptomyces albus, Propionibacterium freudenreichil, Streptococcus lactis, Lactobacillus sp, Rhodospseudomonas sp, Streptomyces griseus, Aspergillus oryzae, Mucor hiemalis, Candida utilis y Saccharomyces cerevisiae.</i>	Cinco bacterias, tres hongos y una levadura	Pila	-	El proceso duro 36 días	[81]

No.	Sustrato	Masa de residuos	T amb (°C)	pH	Rel C/N	Microorganismos inoculados	Tipo de m/mo	Escala	Volteo	Duración	Ref.
20	Residuos de cocina y paja de maíz	220 kg	25	6,8	21	<i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Paenibacillus humicus</i> , <i>Aspergillus fumigatus fresenius</i> , <i>Trichoderma longibrachiatum</i> , <i>Trichoderma sp.</i>	4 bacterias 3 hongos	Caja de compostaje estática aireada	Cada 10 días	El proceso duro 60 días	[82]

Nota: En la presente tabla se observa la investigación que se realizó de los 20 artículos en donde se ve reflejada la inclusión de microorganismos en el proceso de compostaje, mostrando cada una de las características.

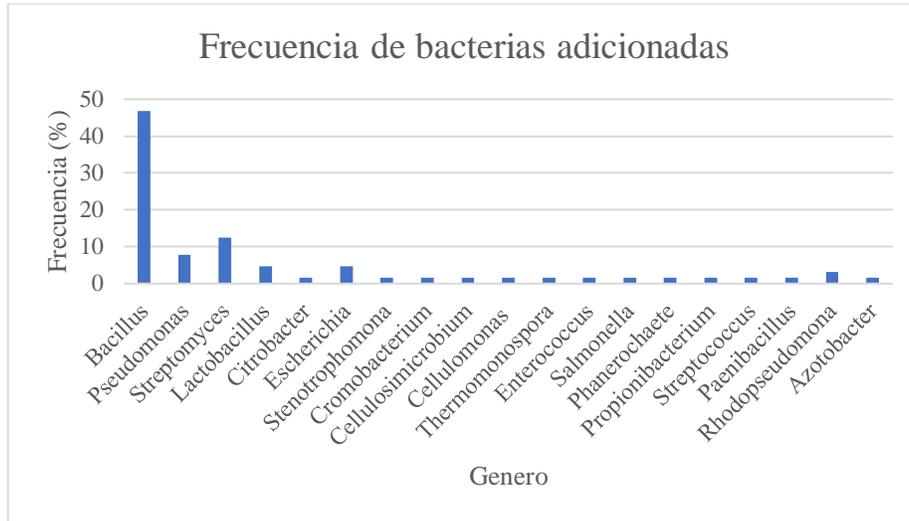
Como se puede observar en la Tabla 16 se estudiaron 20 artículos en los que se realiza la inclusión de microorganismos para conocer el comportamiento de estos durante el proceso sin tener una limitación específica ya sea por un número o tipo de microorganismo, sustratos, caracterización de los residuos como temperatura ambiente a la cual se empezó a realizar el proceso, pH y relación C/N, tipo de proceso o escala, número de volteos o tipo de aireación, todo esto con el fin de realizar un amplio análisis donde se pueda comparar las diferentes propiedades con el proceso que realizamos para escoger el tipo de inóculo que se puede adicionar como una sugerencia en la propuesta al conjunto.

Se identifica que existen diferentes tipos de sustratos entre los que se encuentran en su mayoría residuos sólidos, pajas, aserrín, estiércol de animales provenientes de la granja y domésticos. Varios de estos se mezclan para obtener las propiedades iniciales que requiere el sustrato para llevar a cabo el proceso ya sea por compostaje que en su mayoría se trabaja por pilas, reactores o cajas estáticas aireadas, o por lombricultura que se trabaja en pozos. De igual forma se pueden adicionar ciertos microorganismos que permiten disminuir el tiempo del proceso o mejorar la calidad del producto final, observando que en la mayoría de los casos se adicionan bacterias en mayor composición ya que como se ha mencionado anteriormente son las que predominan durante las cuatro etapas del proceso, seguido de hongos, actinomicetos y por último levaduras.

Para empezar, se realizaron la Figura 35 y Figura 36, donde se pueden observar la frecuencia de adición para cada uno de los géneros de las bacterias y hongos.

Figura 35

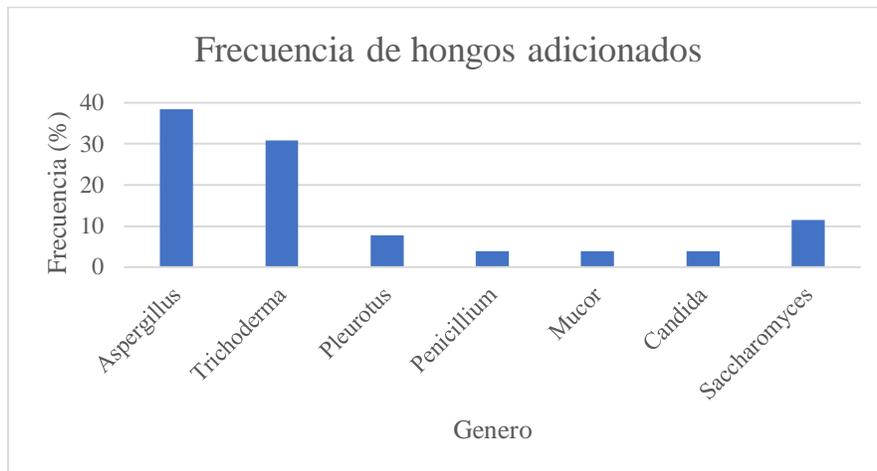
Grafica de la frecuencia del género de bacterias adicionadas al proceso.



Nota: En la figura se observa la frecuencia por género de las bacterias adicionadas para acelerar el proceso de compostaje, encontradas en los 20 artículos estudiados.

Figura 36

Grafica de la frecuencia del género de hongos adicionadas al proceso.



Nota: En la figura se observa la frecuencia por genero de hongos adicionados para acelerar el proceso de compostaje, encontrados en los 20 artículos estudiados.

Es así como en la Figura 35 se puede determinar que, de 64 bacterias utilizadas en los artículos para acelerar el proceso de compostaje, el 47% son del género *Bacillus*, seguidas de *Streptomyces* con un 13%, y en tercer lugar se encuentran las *Pseudomonas* con un 8%. De igual forma en la Figura 36 se puede observar que, de 26 hongos utilizados para acelerar el proceso de compostaje en los 20 artículos, el 38% corresponde a el género *Aspergillus*, seguido del género *Trichoderma* con un 31% y, en tercer lugar, se encuentra la levadura *Saccharomyces* con un 12%.

Para escoger el artículo se empezará descartando los que no cumplen con ninguno de los parámetros establecidos en nuestro proceso, seguido de los que cumplen con algunos parámetros y finalizando con los que más se asemejan al proceso experimental que se realizó, de esta manera se dará a conocer el artículo que se dará al conjunto como propuesta.

Dos de los artículos seleccionado son de lombricultura o mejor conocido como vermicompostaje, este tipo de degradación de residuos orgánicos se realiza en pozos, en ambos casos con medidas de 1m x 1m x 1m [75] junto con la combinación de compostaje y lombricultura disminuyeron el tiempo entre 30-50 días. Como resultados obtuvieron una disminución significativa del carbono orgánico total ya que disminuyo de 56,07% a 20,28% durante el compostaje previo a la descomposición y gradualmente se redujo a 12,60% durante el vermicompostaje [76]. Sin embargo, sus resultados contradicen ciertos reportes tomados de la literatura ya que la degradación fue más rápida en el compostaje que durante el vermicompostaje. El proceso de degradación es acelerado por la síntesis de auxinas, vitaminas, ácidos acéticos, sustancias de crecimiento y antibióticos antifúngicos por *A. niger* y *T viridae* [76].

En cuanto al método de lombricultura inicialmente se utilizaron 50 lombrices provenientes de estiércol de vaca, durante el proceso se vio un aumento notable de estas, por lo que el crecimiento se puede asociar a la baja relación de C/N del predescompuesto sustrato y el papel de los bioinoculantes utilizados. Cabe resaltar que varios estudios indican que las lombrices utilizan microorganismos en sus sustratos como fuente de alimento y puede ser similares para adicionarse al proceso.

Los siguiente seis artículos, con el número 3,7,8,15, 17,18, son documentos en los que se utilizan en su mayoría como sustrato estiércol de algún animal proveniente de una granja junto con paja o

tierra, cada uno de estos relacionados ya que en su mezcla tienen microorganismos similares para adicionar en el proceso.

Cada una de estas adiciones de microorganismos durante el proceso favoreció por completo las condiciones finales del abono ya que al incluir el inóculo, la comunidad microbiana del proceso cambió, lo que modificó la actividad enzimática que fue clave para el aumento y la duración de la temperatura, indicando que los microorganismos activos permanecieron viables durante un largo periodo y se relacionaron con los microorganismos autóctonos [9]. La clave estuvo en que los agentes bacterianos mezclados con *B. thermoruber* mejoraron la descomposición de la lignocelulosa, extendieron la duración del periodo de altas temperaturas y aceleraron el proceso de compostaje [65].

El contenido de agua para el compostaje es importante ya que es usada por los microorganismos, esta es evaporada durante el proceso, es decir que disminuye y por ende la tasa de descomposición. De igual forma se observó una disminución en el contenido de carbono orgánico total durante las primeras semanas del compostaje y una disminución en el contenido de nitrógeno total de la masa del compostaje durante la fase termófila. Por lo que las pilas inoculadas presentaron una disminución más rápida en la relación C/N debido a la mayor pérdida gaseosa de carbono como CO₂, mientras que el nitrógeno permaneció más estrechamente ligado en combinación orgánica con ligeros cambios [80].

Por lo que en los artículos se observa un incremento en la temperatura durante el proceso, acelerando la degradación de la materia orgánica y en algunos casos mejorando la calidad del producto final, sacando como conclusión que las pilas inoculadas con cultivos mixtos maduran más rápido que las pilas con una sola cepa para estos sustratos [69] [80]. Un caso particular se encontró en el artículo 7 donde a pesar que la adición de los microorganismos no permitió acelerar la tasa de degradación de los residuos orgánicos, si mejoró la calidad del producto final. Sin embargo, no se escogieron debido a que los sustratos no son acordes al proceso experimental que se utilizó y algunos en su caso no cumplen con ciertos parámetros que se puedan comparar con la parte experimental o no favorecen el tiempo de degradación de los residuos.

En el siguiente análisis se incluirá los artículos 6, 9 y 12, los cuales utilizan como sustratos residuos de diferentes alimentos en específico, algunos mezclados con paja y poda. El artículo 12 se enfocaron en la degradación de la lignocelulosa ya que es uno de los compuestos más

resistentes a la degradación durante el proceso, por lo que el propósito de la inoculación fue disminuir la concentración de la lignina, conociendo que el *U. termosphaericus* fue el inoculo más efectivo para este objetivo. Sin embargo, los resultados no son los mejores ya que el tiempo total del proceso fue de 180 días, lo que no favorece comparándolo con el proceso realizado [74].

Así mismo para los otros dos artículos se ve un aumento de la temperatura gracias a la inclusión del inoculo en el proceso, sin embargo en uno de los documentos la humedad fue baja durante todo el proceso, lo que influyo en los picos de temperatura, disminuyendo la actividad microbiana y de esta manera no hay una disminución significativa del tiempo durante el proceso ya que este bajo de 91 días a 78 días, no obstante la pila inoculada presento mayor concentración de los nutrientes totales en el resultado final, lo que aumenta la calidad [71]. Por último, el otro artículo si consiguió resultados significativos ya que disminuyeron el tiempo a 40 días obteniendo un abono de calidad, junto con un relación C/N estándar [68]. Sin embargo, ninguno de estos dos últimos artículos se escogió debido a que no cumplen con sustratos parecidos al que se trabaron en el proyecto y algunos no tienen resultados que beneficien el producto final.

A continuación, se hablarán de cinco artículos, 2,5,11,19,20, en los que su sustrato contiene residuos orgánicos, sin embargo, se mezclan con otros elementos como paja, estiércol, hojas y/o pasto. El artículo 5, al utilizar diferentes sustratos, observaron que unos se degradaron más rápido que otros, por lo que el proceso tomo un tiempo total de 120 días, junto con una humedad del 50% y una relación de carbono nitrógeno de 25-30%, recalando que al final el papel periódico fue el único residuo que no se degrado en su totalidad [63]. Por lo que este artículo es descartado ya que al tratarse de muchos sustratos en donde la degradación de cada uno es dispareja, hace que el proceso no sea eficiente.

Los otros cuatro artículos si presentan beneficios en el proceso. En ello se observa que la dinámica asociada al aumento de temperatura es la presencia de compuestos solubles como azucres y almidones y también las fuentes como la lignina y la celulosa, las cuales son degradadas en la fase termófila, por lo que la temperatura busca mantener picos altos hasta que se agota dicha disponibilidad. Por lo que la adición de los microorganismos acelera la transformación de la materia orgánica, generando competencia con otros microorganismos por la disponibilidad de alimento que se va agotando en menor tiempo [73]. Así mismo la humedad fue otro parámetro que se vio favorecido por la actividad microbiana ya que disminuyo en un 44,3%

al final del proceso lo que demuestra que los microorganismos inoculados fueron más activos que los que se encuentran dentro del proceso [82]. Otro parámetro importante fue el pH ya que en la pila inoculadas aumento más rápido junto con la temperatura debido a la fermentación durante el proceso.

Por lo que los artículos demuestran eficientes resultados al agregar los microorganismos ya que prolonga la fase termófila aumentando la temperatura y el pH, permitiendo obtener un abono con mejor calidad y rápida madurez. Sin embargo, no se escogerá ninguno de estos artículos ya que a pesar de que tienen como sustrato los residuos orgánicos, los mezclan con muchos más residuos y puede sesgar el perfil que tiene el proceso experimental.

Por último, se hablarán de los artículos 1,4,10 y 16, los cuales son los que más se asemejan al proceso experimental ya que tienen el mismo sustrato, para ello se dará una explicación más detallada de cada uno de los artículos en donde se dirá las razones para llegar a escoger el artículo final para la propuesta.

El artículo No. 1 tiene como propósito inocular microorganismos que se encuentran en la pila de la misma planta durante las primeras 3 semanas del proceso, allí se realizó un aislamiento en placas con medio saboureaud tripteina de soya para no perder microorganismos que colonizan a bajas concentraciones. Estas se inoculan a 28°C por 5 -7 días para el caso de los hongos y a 37°C por 48 horas para las bacterias. Después se sembraron en agar nutritivo. Las cepas bacterianas se identificaron mediante las siguientes pruebas: morfología, coloración de Gram, Movilidad en fresco, Catalasa, hidrolisis de gelatina, mientras que las cepas fúngicas se identificaron mediante estudios morfológicos [63].

Para la selección se eligieron aquellas que demostraron mayores actividades amilolítica y celulítica de acuerdo a los halos de degradación obtenidos en los cultivos. De 30 cepas bacterianas 10 presentaron mayor halo de degradación y de 10 cepas fúngicas se seleccionaron dos de las más activas, lo que completo 12 cepas, después se descartaron las cepas con baja actividad degradativa entre ese mismo grupo quedando las seleccionadas para el proceso. [63].

Como resultado se demostró la potencialidad en el inoculo debido a sus capacidades metabólicas, ya que *Bacillus* y *Pseudomonas* producen amilasas que degradan el almidón al igual que *Aspergillus* que también produce proteasas, glucoamilasas y pectinasas. En primera instancia la

temperatura en la pila inoculada alcanzo el pico una semana antes que la pila sin inocular y se mantuvo por más tiempo, lo que refleja una mayor actividad metabólica, beneficiando la eliminación de potenciales patógenos presentes. El pH presenta una diferencia en la segunda semana comparada con la pila sin inocular, ya que en las pilas inoculadas aumento en forma lenta y gradual. El producto final tuvo un pH neutro.

La relación C/N evaluada en las pilas tiende a disminuir ya que empezó en 30, y en la semana 12 se obtuvo un valor de 15. Por último, el proceso redujo su volumen un 35% demostrando que las pilas inoculadas alcanzaron su estabilidad y madurez en menor tiempo y cumplió con los parámetros de calidad establecidos por la ley [63]. Sin embargo, este proceso redujo el tiempo de 24 semanas a 20 semanas, equivalente a 150 días, lo que significa que duro más que el proceso experimental realizado en este proyecto, por lo que se descarta este artículo.

El artículo No. 4 tiene como propósito utilizar en una pila un inóculo comercial llamado MicroGest10X, el cual es una combinación de enzimas y microorganismos. Las pilas, una sin inóculo y la otra incluyendo el inóculo, fueron construidas con 2 m de base y 1.5 m de altura, de 30 Ton de residuos con desechos de poda en una proporción de 2:1, y se realizó volteo una vez por semana. Como resultados se encuentran que el rango termófilo alcanza fácilmente la pila inoculada y la pila de control por lo que no hay un cambio significativo en este parámetro, así mismo la humedad disminuyó rápidamente para las dos pilas, por lo que necesitaron adicionar agua para mantener el nivel de humedad requerido en el proceso. Esto afirma que no hubo diferencias entre las dos pilas estudiadas. Sin embargo, el artículo concluye que el inóculo es eficaz para acelerar el compostaje, especialmente en la fase termófila [62].

Este estudio alcanzo a disminuir el tiempo de degradación de 90 días a 70 días, algo que no es significativo comparado con el proceso experimental desarrollado, de igual forma hace falta un análisis profundo de ciertos parámetros importantes que se deben tener en cuenta durante el proceso del compostaje, como es la relación C/N o el pH, los cuales no son mencionados en este y hace que la información sea más sesgada, por tal motivo este artículo no fue escogido para la propuesta a pesar que tiene el sustrato del proceso [62].

Es así como quedan 2 artículos que tienen mayor similitud con el proceso experimental realizado, el artículo No. 10 es un experimento realizado con desechos sólidos municipales donde se secan, trituran y se inicia el proceso de compostaje en pilas de 5Kg y se suministró aire

por medio de dos aireadores de acuario mediante tubos de PVC. Se realizó un estudio de cuatro compostadores diferentes, el primero es el compostador de control, el segundo tiene aireación y glucosa, el tercer es aireación, glucosa y ácido acético, y la última tiene aireación, glucosa, ácido acético y un inóculo microbiano. Las cuatro pilas se iniciaron al mismo tiempo donde se buscó mantener una humedad del 55% en todas.

Como resultado encontraron que en las cuatro pilas tuvieron un aumento de temperatura igual en la primera fase, sin embargo, el aumento de temperatura fue mayor para las tres pilas inoculadas con un rango entre 36-40°C, que para la de control, dando mejor resultado la inoculada con aire más glucosa seguida de la que incluye la inoculación de los microorganismos [72]. Así mismo el pH mostro su punto máximo en las pilas con adición del inóculo a comparación de la de control, por el contrario, esta registró una disminución con el tiempo. Este aumento se debe como resultado de la amonificación de los componentes de N₂ en el compostaje, por lo que se le atribuye a la rápida degradación de la materia orgánica junto con la amonificación. Lo contrario sucede con la pila de control ya que al presentar bajo pH significa una lenta degradación de la materia orgánica, lo que se puede asociar por la conversión de C/N [72].

Respecto a la relación C/N, se muestra mejores resultados en las pilas inoculadas especialmente en la pila con aire y glucosa con un valor de 11,65 y esta reducción sucedió en la primera etapa del proceso mientras que la pila de control tuvo una relación C/N de 18,04. Esta relación por debajo de 20 indica una madurez aceptable del compostaje, sin embargo, no es el único parámetro importante para medir la madurez del resultado final. Así este proceso tuvo resultados en menos de 20 días, diferente de la pila de control que duro más de 20 días [72].

Por otro lado, el artículo 16 utiliza residuos sólidos urbanos mezclados con aserrín con un total de 600 kg junto con una relación C/N de 25 y una temperatura ambiente de 21°C. Este proceso se realizó en 4 reactores donde se identifican como el reactor de control, reactor A el cual tiene una inoculación de tres bacterias *Bacillus*, el reactor B tiene una inoculación de una bacteria y un hongo y el reactor C es una combinación de las tres bacterias y los dos hongos. El diseño de reactor es de 34 L, el cual se encuentra envuelto con capa de Poliuretano de 10 cm de espesor para aislamiento térmico. Se le proporciono aire por una bomba a través de un tubo de PVC y se utilizó un sensor de temperatura para medir este parámetro con precisión. Con respecto a los microorganismos se aislaron en placas de agar por disolución, donde las cepas mesófilas y

termófilas fueron tomadas del proceso de compostaje. Se aislaron y mantuvieron en agar triptona soja y agar peptona respectivamente [78].

Como resultados se obtuvo que la temperatura aumento gradualmente después de ajustar el contenido de húmedas y se introdujera el flujo de aire. El calor metabólico generado facilito la degradación de la materia prima. El perfil de temperatura de los procesos de compostaje con inoculación fue similares al perfil de temperatura del reactor de control sin embargo los picos de temperatura fueron diferentes ya que en la ejecución A el pico se alcanzó en 5 días mientras que para el reactor B y C se alcanzó en 10 y 8 días respectivamente, y se mantuvieron mayor tiempo comparado con el reactor de control, esto se debe a que el experimento A contiene mayor cantidad de microorganismos importantes del proceso, lo que permite descomponer rápidamente la materia orgánica soluble y biodegradable, como monosacáridos, almidón, lípidos y proteínas, y aumentar la temperatura hasta un valor alto en poco tiempo. Sin embargo, el experimento C aparte que consiguió una temperatura relativamente alta, también la mantuvo por más tiempo, lo que evidencia una degradación más efectiva y rápida [78].

Así mismo el proceso sugiere que la inoculación permite alcanzar la población máxima en un tiempo más corto, comparado con el compostaje de control. Por lo que se señaló que la inoculación sería una forma eficaz de mejorar la concentración microbiana y así mismo aumentar la tasa de compostaje. Además, al inocular microorganismos complejos, las tasas máximas de degradación mejorarían debido a la alta bioactividad del inoculo. Dado que el reactor C contenía una mezcla de los inóculos presentes en los reactores A y B, presento la velocidad de degradación más alta comparada con el experimento A y B [78].

Otro indicador importante es el de la estabilidad de los productos de compostaje, cuanto menor es más estable será el producto, por lo que el experimento C presento el menor valor de 154,25 g/kg, lo que indica que el inoculo que contiene cepas celulolíticas y hongos podrían estabilizar eficientemente el proceso del compostaje, las cuales se encuentran en el experimento B y C. Por este motivo se puede concluir que la adición de estos inóculos al compostaje fue eficiente permitió acelerar la tasa de degradación, reducir las emisiones de gases y estabilizar los productos de compostaje, en especial el experimento C el cual tuvo el mejor rendimiento de los cuatro experimentos realizados [78].

Al analizar cada uno de los artículos se puede concluir que la inoculación de los microorganismos puede ser eficiente siempre y cuando se cumpla con los parámetros iniciales que necesita el proceso para llegar al abono, como también escoger los microorganismos que sirvan para degradar los compuestos que trae cada uno de los sustratos y así conseguir un proceso que pueda lograr el objetivo de esta inoculación, el cual es reducir el tiempo de degradación del compostaje.

Es así como se escogió el artículo No. 16 llamado “Process kinetic of inoculation composting of municipal solid waste” ya que tiene parámetros iniciales similares a los obtenidos en el experimento y el sustrato, permitiendo disminuir el tiempo del proceso a 30 días con la presencia de cuatro bacterias *Bacillus azotofixans*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus mucilaginosus* y *Streptomyces cellulosa*, y un hongo *Trichoderma koningii*. Esta será la propuesta que se pasará al conjunto para poder degradar con facilidad los residuos.

5. ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se desarrollará un análisis de costos para la implementación del sistema de compostaje de residuos orgánicos residenciales a partir de un reactor horizontal aerobio y la posible adición de una mezcla de microorganismos al proceso, teniendo en cuenta la experimentación y su puesta en marcha a gran escala.

Actualmente se producen al día alrededor de 32,84 kg de residuos orgánicos para una producción mensual de aproximadamente 985,05 kg en el 18% de apartamentos que se encuentran en el conjunto. Cabe resaltar que esta cantidad está ligada a la colaboración de los residentes. La cantidad de abono que se consigue al finalizar el proceso corresponde al 46% de materia prima inicial, es decir que para este proceso de compostaje es posible obtener alrededor de 453,12 kg de abono orgánico si se hace para el total de los residuos generados mensualmente.

5.1 Costos para la experimentación

En esta sección se hace un análisis de costos para la puesta en marcha inicial del proceso de compostaje, es decir, el reactor horizontal instalado para la transformación de 63,55 kg de residuos orgánicos.

5.1.1 Costos de inversión

Los costos de inversión están relacionados a todo equipo, materia prima, mano de obra o adecuación del terreno, estos se pueden observar en la Tabla 17

Tabla 17

Costos de inversión de la materia prima para la construcción del reactor

Material	Cantidad	Costo (\$)	Costo total (\$)
Caneca de polietileno	1	85.000	85.000
Tubo PVC	1	4.500	4.500
Base de madera	1	30.000	30.000

Material	Cantidad	Costo (\$)	Costo total (\$)
Mano de obra reactor	1	20.000	20.000
Medidor multifuncional	1	125.000	135.000
Platón para lixiviado	3	5.000	15.000
Bolsa ziploc para abono orgánico	40	450	18.000
		Total	307.500

Nota: En la presente tabla se observan los costos para la implementación del proceso de compostaje a nivel laboratorio.

Hay que tener en cuenta que, los residuos orgánicos y de poda no tienen algún costo ya que son aportados por los residentes del conjunto, pero para caracterizar la materia prima inicial, se debe hacer una prueba la cual fue realizada en el laboratorio AGRILAB y tiene un costo de 114.900. Por otro lado, al finalizar el proceso de compostaje se debe realizar una caracterización con el fin de identificar si el abono orgánico cumple con las especificaciones encontradas en la norma NTC 5167, realizado en el laboratorio de aguas y suelos de la Universidad Nacional y su costo es de 154.900.

Los costos totales para desarrollar la propuesta experimental, es decir a pequeña escala, son de 577.300 pesos colombianos. De esta manera se podrá conseguir 31,7 kg de abono orgánico para su respectivo uso o comercialización.

5.2 Costos a gran escala

En esta sección se hace un análisis de costos para la propuesta general del proceso de compostaje, es decir, los reactores horizontales que deben ser instalados para la transformación de aproximadamente 985,05 kg de residuos orgánicos en compost, los cuales son generados mensualmente por el conjunto residencial.

5.2.1 Costos de adecuación del terreno

El proceso de compostaje requiere de un aislamiento básico con el fin de evitar la luz directa, el exceso de humedad, el contacto animal y la manipulación de residentes. Es por esto que se debe implementar un techo y cubrir los laterales con plástico, esto teniendo en cuenta que el lugar donde se va a realizar el proceso es al aire libre.

Tabla 18

Costos para la adecuación del terreno

Adecuación	Área (m²)	Costo (\$/m)	Total
Techo	7,59	34.900	279.200
Laterales	12,40	7.600	98.800
Mano de obra	7,59	20.000	160.000
		Total	538.000

Nota: En la presente tabla se observa los costos para la adecuación del terreno necesarios para la implementación del proceso a gran escala.

5.2.2 Costos de mano de obra

Los costos de mano de obra están asignados dependiendo del número de participantes en el proceso. Para este caso se requieren dos personas, un operario encargado de hacer la recolección de los residuos, pesarlos y controlar cada una de las variables del proceso haciendo las mediciones respectivas una vez por semana, con un tiempo laboral de 12 horas semanales. La recolección de residuos de poda se paga por hora trabajada.

Tabla 19*Costos del operario*

Concepto	Tiempo de labor por semana (horas)	Valor por hora (\$/hora)	Valor mensual (\$)	Valor anual (\$)
Desarrollo de compostaje	12	6.000	288.000	3.456.000

Nota: En la presenta tabla se puede observar los costos asociados al operario encargado del proceso a gran escala.

De igual forma, se requiere un ingeniero que estará en la responsabilidad de mantener el desarrollo optimo del proceso de compostaje, realizará la propuesta más adecuada para el aprovechamiento de lixiviados y hará las modificaciones adecuadas durante cada etapa del compostaje, realizando informes mensuales y recomendaciones para mejorar el proceso sin afectar los costos.

Tabla 20*Costos del ingeniero*

Concepto	Horas laboradas por mes (\$/mes)	Valor por hora (\$)	Valor mensual (\$)	Valor anual (\$)
Control de proceso de compostaje	12	25.000	300.000	3.600.000

Nota: En la presenta tabla se puede observar los costos asociados al ingeniero encargado del proceso a gran escala.

Cabe resaltar que los costos de mano de obra fueron tomados en base a los salarios establecidos legalmente en Colombia para el año 2022 y el ingeniero que se requiere para el proceso trabajará un total de 4 meses en el año distribuidos en visitas e informes ocasionales y se le pagará seguridad social donde el aporte a salud será del 12,55%, a pensión del 16% y ARL de nivel II del 1,044%, dando como valor mensual \$88.782 pesos colombianos.

5.2.3 Costos de inversión

Los costos de inversión están relacionados a todos los equipos y materiales que deben ser adicionados en el proceso con el fin de suplir las necesidades en cuanto a control y desarrollo del mismo. Estos costos están considerados en la Tabla 21. Cada equipo ha sido descrito en el capítulo de la propuesta para el aprovechamiento de los residuos en el Conjunto residencial. Es necesario la instalación de un total de 5 reactores para el aprovechamiento del total de residuos semanalmente (230 kg), por lo cual se realizará el llenado del reactor 1 al día 0 del reactor 2 al día 8 y así semanalmente hasta completar los reactores y así garantizar el aprovechamiento de los residuos generados mensualmente. Una vez finalizado el proceso de los 5 reactores, se rellena el reactor 1 y se da inicio de nuevo al proceso de compostaje.

Tabla 21

Costos de inversión en equipos y materiales

Equipo	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)	Ref
Reactor construido	5	154.500	772.500	-
Placa de recepción lixiviados	5	85.000	425.000	[83]
Bolsas de polietileno (x100 und)	1	4.200	4.200	[84]
Selladora manual 110V	1	99.000	99.000	[85]
pH-metro para suelos HI-981030	1	498.900	498.900	[86]
Termómetro HI-935002	1	696.090	696.090	[87]
Medidor de humedad Extech-MO750	1	990.390	990.390	[88]
Triturador De Residuos Orgánicos Jtr200	1	1.530.000	1.530.000	[89]
		Total	5.016.080	

Nota: En la presente tabla se observan los costos de equipos necesarios para el proceso de compostaje a gran escala.

5.2.4 Costos totales

Los costos totales anuales durante la producción de aproximadamente 3940,20 kg de compost durante el año están reflejados en la Tabla 22

Tabla 22

Costos totales

Costos de adecuación del terreno	538.000
Costos de mano de obra	8.121.384
Costos de inversión	5.016.080
Total	13.675.464

Nota: En la presente tabla se observan los costos totales para la implementación del proceso de compostaje a gran escala.

Los costos totales para desarrollar la propuesta son de \$13.675.464 pesos colombianos de los cuales la adecuación de terreno e inversión se tienen en cuenta solo para el año cero, los costos de operación anual serán de \$8.121.384 pesos colombianos. Del conjunto residencial depende la decisión de vender el abono orgánico a otros conjuntos aledaños o usarlo completamente para las zonas verdes. Ya que el abono orgánico puede ser vendido en presentaciones de 1 kg a \$ 4.000 y 10 kg a 18.000.

5.3 Costos de inclusión de microorganismos

En esta sección se hace un análisis de costos para la inclusión de los microorganismos al proceso de compostaje, permitiendo la disminución del tiempo de descomposición de los residuos de 88 días a un rango entre 30 y 40 días aproximadamente, es decir los costos de inoculación de algunos microorganismos para la transformación de aproximadamente 985,05 kg de residuos orgánicos, los cuales son generados mensualmente por el conjunto residencial.

5.3.1 Costos de inversión

Los costos de inversión para la inclusión de los microorganismos están relacionados a todos los equipos y materiales que se requieren para llevar a cabo la inoculación de estos. Los costos se observan en la Tabla 23

Tabla 23

Costos de inversión con inclusión de microorganismos.

Insumo	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)	Ref
<i>Bacillus mucilaginosus</i>	1	570.425	570.425	[90]
<i>Bacillus azotofixans</i>	1	366.700	366.700	[91]
<i>Bacillus megaterium</i>	1	301.513	301.513	[92]
<i>Streptomyces cellulosae</i>	1	366.700	366.700	[93]
<i>Trichoderma koningii</i>	1	366.700	366.700	[94]
Refrigerador	1	169.569	339.138	[95]
Agar triptona de soja (500 gr)	1	259.932	259.932	[96]
Agar peptona (500 gr)	1	485.550	485.550	[97]
Caja de Petri plástica	10	17.800	178.000	[98]
Asa bacteriológica	2	4.359	8.718	[99]
Matraz cónico de 2L	2	129.488	258.976	[100]
Tapón de caucho	2	28.595	57.190	[101]
Manguera	1	62.790	62.790	[102]
Bomba de aire	1	98.050	98.050	[103]
Filtro de aire	1	78.450	78.450	[104]
		Total	3.285.832	

Nota: En la presente tabla se observan los costos de insumos requeridos para la implementación del proceso de compostaje con la inclusión de microorganismos a gran escala.

Se debe tener en cuenta que los costos de inversión son de \$3.285.832 pesos colombianos para el año cero, sin embargo, anualmente se debe realizar la compra de los medios de cultivo para los microorganismos que suman \$745.482 pesos colombianos.

5.3.2 Costos totales

Los costos totales anuales durante la producción de aproximadamente 10835,55 kg de compost durante el año con la inclusión de los microorganismos están reflejados en la Tabla 24, ya que al incluirlos el tiempo de compostaje se reduce y es posible la realización de más cargas de residuos orgánicos para descomposición, logrando aumentar la producción de compost desde 3940,20 kg hasta el mencionado.

Tabla 24

Costos totales con inclusión de microorganismos

Costos de adecuación del terreno	538.000
Costos de mano de obra	7.056.000
Costos de inversión	5.016.080
Costos de inclusión de microorganismos	3.285.832
Total	15.895.912

Nota: En la presente tabla se observan los costos totales para la implantación del proceso de compostaje con la inclusión de microorganismos a gran escala.

Los costos totales para llevar a cabo la propuesta con la inclusión de los microorganismos son de \$15.895.912 pesos colombianos para el año cero, los costos anuales que suman la operación y los medios de cultivo son de \$7.801.482 pesos colombianos. El conjunto residencial decide si desea incluir los microorganismos y vender el abono orgánico a otros conjuntos aledaños o usarlo completamente para las zonas verdes. Ya que el abono orgánico puede ser vendido en presentaciones de 1 kg a \$ 4.000 y 10 kg a \$18.000, y así obtener ingresos anuales por encima de los \$23.000.000 de pesos colombianos.

6. PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS RESIDENCIALES

Para llevar a cabo el proceso de compostaje en el conjunto residencial Camino de la esperanza es necesario especificar los requerimientos y equipos que intervienen en el proceso. Para esto se establecen algunas condiciones como: Cantidad de residuos que se compostaran al mes, condiciones de operación, requerimientos del reactor horizontal y la selección de los equipos. Todas estas consideraciones se estudiarán a continuación.

6.1 Producción de residuos orgánicos y compost

Durante el proceso se obtuvo un total de 65,67 kg de residuos orgánicos recolectados por dos días, los cuales fueron aportados por el 18% de los residentes del conjunto. Luego de la transformación fue posible obtener 31,7 kg de compost maduro o abono orgánico. La determinación de la cantidad de residuos orgánicos producidos al mes fue hallada a partir de la producción per cápita de residuos por persona, la cual fue calculada en el capítulo 2 y la cantidad aproximada de residuos orgánicos producidos mensualmente es de 985,05 kg. Según el proceso de experimentación, la cantidad de abono orgánico que se puede conseguir es de alrededor del 48% de los residuos orgánicos iniciales.

6.2 Condiciones de operación

Durante el proceso hay algunos factores que pueden llegar a modificarse según sea el requerimiento, entre ellos están la humedad, aireación o volteo y tamaño de partícula ya que de estos depende la necesidad de cambiar alguna variable de proceso descrita anteriormente (T, pH). Teniendo en cuenta la cantidad de residuos producidos mensualmente y según la cantidad obtenida de abono orgánico al final del proceso, se establecen los requerimientos para desarrollarlo.

6.2.1 Tamaño de partícula

Para que el proceso se desarrolle en el menor tiempo posible, el tamaño de partícula debe estar entre 1 y 5 cm. Ya que, a menor tamaño de partícula, menor tiempo de descomposición. Los residuos orgánicos deben ser sometidos a un pre tratamiento antes de iniciar el proceso de compostaje, donde se reduce el tamaño de partícula por medio de un triturador de residuos orgánicos.

6.2.2 Humedad

La humedad del proceso debe estar entre 40% y 60%, para el control de esta se hace la aireación o la aspersión de agua, dependiendo del porcentaje en el que se encuentre. La relación carbono-nitrógeno (C/N) de las materias primas debe estar entre 15 y 30.

6.2.3 Aireación

El proceso de compostaje es aerobio, para esto se requiere una aireación que permita el crecimiento de los microorganismos, de esta manera evitar que se compacte el material orgánico causando la disminución del proceso metabólico. Para esto se realizan volteos de manera manual una vez por semana haciendo control de temperatura y evitando la inhibición del proceso metabólico de los microorganismos.

6.3 Diseño del reactor

Después de seleccionar el proceso de compostaje por medio de un reactor horizontal aerobio, en el cual se utiliza un cilindro con una tapa en la parte superior para el ingreso de las materias primas y un tubo que atraviesa su eje para facilidades en la aireación, se debe realizar las dimensiones de este para la cantidad de residuos producidos mensualmente por el conjunto.

6.3.1 Tamaño del reactor

Para realizar el proceso de compostaje a un escalamiento que permita el aprovechamiento de todos los residuos orgánicos producidos al mes por los habitantes del conjunto, se tiene el modelo de semejanzas.

La semejanza geométrica, la cual consiste en que el cociente de todas las longitudes entre el modelo y el prototipo sea el mismo, el cual se cumple ya que se realizara de forma idéntica al prototipo haciendo un aumento en el volumen [105].

La semejanza cinética, la cual depende de la semejanza geométrica ya que la velocidad de reacción del prototipo debe ser la misma al modelo, es por esto que se plantea el monitoreo de variables de proceso [105].

La semejanza dinámica, que depende de las fuerzas inerciales y viscosas del prototipo, la cual se estaría cumpliendo ya que no cambian las condiciones debido a que el material que va a ingresar al reactor es el mismo [79].

Para dimensionar el reactor teniendo en cuenta el modelo de semejanza geométrica se realiza el siguiente cálculo. Para un total de 65,67 kg de residuos orgánicos son necesarios 9,85 kg de residuos de poda para un total en peso de 75,52 kg de material compostable, el prototipo de reactor para esta cantidad de residuos tiene un volumen de 55 galones (0,21m³), el cual corresponde al usado experimentalmente llenado en un 70%, y es por esto que la capacidad de este es alrededor de 130 kg. El Conjunto produce 230 kg por semana, lo cual es dos veces más que lo usado en el prototipo inicial, y para este sería necesario un volumen de 110 galones (0,42 m³). Cumpliendo con la semejanza geométrica se realizó el dimensionamiento del reactor utilizando la siguiente ecuación que corresponde al volumen del cilindro.

Ecuación 3

Volumen de un cilindro

$$V = \pi * \left(\frac{D^2}{4}\right) * h_{cilindro}(1)$$

Existe una relación entre la altura y el diámetro que es $1,5 \cdot D = h$, y así se puede relacionar estos parámetros con el volumen del reactor de la siguiente manera

Ecuación 4

Altura de un cilindro

$$h_{cilindro} = 1,5 * D$$

La ecuación 3 es despejada y se calcula el diámetro del reactor como se observa en el Anexo 6, para la producción de 110,40 kg de abono orgánico cumpliendo con el método de semejanzas y teniendo en cuenta que el volumen debe ser de 110 gal, se obtienen las siguientes dimensiones para el reactor.

Tabla 25

Dimensionamiento del reactor

Medida	Valor (m)
Altura	1,06
Diámetro	0,71

Nota: En la presente tabla se muestra las dimensiones de los reactores implementados a gran escala.

A partir de las medidas del reactor, es necesario determinar las dimensiones de la base que recibirá los lixiviados del proceso, que son generados por el exceso de humedad dentro del reactor. Estas dimensiones se pueden observar en la Tabla 26

Tabla 26

Dimensiones de la base de lixiviados

Medida	Valor (m)
Altura	0,22
Largo	1,01
Ancho	0,68

Nota: En la presente tabla se muestran las dimensiones requeridas para las bases de recepción de lixiviados.

Teniendo en cuenta que estas dimensiones son para un reactor que puede compostar 260 kg de residuos orgánicos y la producción mensual de estos en el conjunto es de 985,05 kg, es necesario instalar cinco reactores de las mismas dimensiones especificadas anteriormente para suplir el 18% de los residuos generados por los residentes y tener una reserva en espacio para aproximadamente 314,95 kg, esto con el objetivo de estar preparados si otros residentes desearan sumarse a la recolección de residuos.

6.3.2 Control de variables de proceso

Las variables del proceso deben ser verificadas durante el tiempo de compostaje, para esto se especifican los instrumentos necesarios para su medición en el reactor, equipo principal del proceso. Las variables involucradas en el proceso se establecen en la Tabla 27

Tabla 27

Control de variables del proceso.

Reactor horizontal	
Variables modificables	H, Aireación
Variables verificables	T, pH

Nota: Aunque la aireación no es una variable medible, es fundamental durante el proceso de compostaje para mantener la actividad microbiana.

Cada una de las variables mencionadas en la Tabla 27 están relacionadas a las diferentes etapas del proceso de compostaje, esto se debe a la actividad metabólica de los microorganismos dentro del reactor. La humedad y la aireación son las variables modificables ya que de estas dependen la temperatura y el pH.

Para hacer control a la temperatura se debe hacer uso de un Termómetro HI-935002 de marca Hanna, el cual es hermético, con un rango de -40°C a 1350°C, tiene pantalla LCD y es capaz de hacer almacenamiento de datos. Se observa en la Figura 37

Figura 37

Termómetro



Nota: En la figura se observa el termómetro necesario para el proceso a gran escala. Tomado de [87] “Termómetro digital Hanna Instruments HI 935002, con 2 canales para sondas tipo K | RS Components.” <https://es.rs-online.com/web/p/termometros-digitales/5066572> (accessed Jun. 01, 2022).

Para medir el pH se usa un pH-metro marca Hanna modelo HI-981030 portátil, contiene electrodo de pH con puente electrolítico reemplazable, pantalla LCD, calibración automática y mide entre 0 y 14. Se puede observar en la Figura 38

Figura 38

pH-metro



Nota: En la figura se observa el pH-metro necesario para el proceso a gran escala. Tomado de: [86] “HI 981030 Medidor de pH para suelos GroLine | HANNA Instruments Colombia.” <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-981030-medidor-de-ph-para-suelos-groline> (accessed Jun. 01, 2022).

Para el control de la humedad se utiliza un medidor de humedad para jardín y compost de marca REOTEMP, el cual toma mediciones entre 0 y 10, es de tipo análogo y cuenta con un vástago de 15 pulgadas. Se puede observar en la Figura 39

Figura 39

Medidor de humedad



Nota: En la figura se observa el medidor de humedad necesario para el proceso a gran escala. Tomado de [88] “Amazon.com: REOTEMP Medidor de humedad de jardín y compost (vástago de 15 pulgadas), herramienta de jardín ideal para pruebas de humedad del suelo, planta, granja y césped.: Herramientas y Mejoras del Hogar.” https://www.amazon.com/-/es/REOTEMP-Medidor-humedad-pulgadas-herramienta/dp/B07DM4LS1D/ref=sr_1_13?__mk_es_US=ÅMÅŽÕÑ&crd=2YHX14Q37WCMJ&keywords=soil%2Bmoisture%2Bmeter&qid=1653787623&srefix=medidor%2Bde%2Bhumedad%2Bpara%2Bsuelos%2Caps%2C133&sr=8-13&th=1 (accessed Jun. 01, 2022).

Para que el proceso de compostaje sea realizado de manera satisfactoria, es necesario una unidad complementaria que pertenece al pre acondicionamiento de los residuos orgánicos y los residuos de poda. Una trituradora de residuos orgánicos Jtr 200, la cual tritura, corta y muele forrajes, semillas, cascaras de huevo, cereales, césped, enredaderas, ramas, hojas, flores secas, residuos domésticos, restos de frutas y verduras, café, pequeños huesos, sobras de comida, maderas mohosas, canastas de paja. Esta cuenta con un motor de 1,5 HP, un suiche de encendido y tres cuchillas. Se puede observar en la Figura 40

Figura 40

Trituradora



Nota: En la figura se observa la trituradora necesaria para el proceso a gran escala. Tomado de [89] “Triturador De Residuos Organicos Jtr200 - Homecenter.com.co.” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/54348/triturador-de-residuos-organicos-jtr200/54348/> (accessed Jun. 01, 2022).

El almacenamiento del producto final se realizará en bolsas de polietileno de alta densidad de 15cm x 25 cm y estas serán selladas con una selladora manual de 110 V. Se puede observar en la Figura 41

Figura 41

Sellador manual



Nota: En la figura se observa la selladora necesaria para el proceso a gran escala. Tomado de [85] “SELLADORA MANUAL DE BOLSA 110V BOLSA 300W(07382-PFS-300) - Ferrolaganga.” <https://ferroelectricoslaganga.com/tiendaonline/es/inicio/792-selladora-manual-de-bolsa-110v-bolsa-300w07382-pfs-300.html> (accessed Jun. 01, 2022).

6.4 Tratamiento de lixiviados

Los líquidos lixiviados, que son generados por el exceso de humedad presente en el compostaje, pueden ser aprovechados como fertilizante orgánico de la siguiente manera: El conjunto dispondrá de recipientes de plásticos de 1.5 L donde se recolectara este líquido que es generado en las primeras semanas del proceso, este se almacenara de 7 a 15 días en un lugar donde no esté en contacto con la luz solar, para esto se puede hacer uso del cuarto donde se encuentran los implementos de aseo y se debe hacer una revisión tres veces por semana donde se evidencia que no hay cambio del color ni haya generación de malos olores. En caso de el cambio de sus propiedades se debe disponer de una empresa, como la Empresa Metropolitana EMGIRS o Cogersa, que haga tratamientos de lixiviados a partir de métodos químicos para poder aprovechar estos líquidos o desecharlos de una manera amigable con el medio ambiente. Por otro lado, este lixiviado puede recircular al proceso de compostaje con el fin de controlar la humedad y mejorar los nutrientes del producto final, este proceso se hace siguiendo el mismo procedimiento del almacenamiento, solo que después de alcanzar las propiedades requeridas se reinyecta a los reactores por la técnica de aspersión, a las tapas de las botellas se les debe hacer perforaciones pequeñas por toda la superficie permitiendo la salida uniforme del líquido y de esta manera agregarlo adecuadamente.

6.5 Proceso de compostaje con la inclusión de microorganismos.

El conjunto tiene la posibilidad de disminuir el tiempo que dura el proceso de compostaje por medio de la adición de microorganismos que permiten acelerar la tasa de degradación de los residuos orgánicos, para ello se escogieron cuatro bacterias: *Bacillus azotofixans*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus mucilaginosus* y *Streptomyces cellulosa*, y un hongos: *Trichoderma koningii*. Estos microorganismos se deben comprar por lo que se incluyen en los costos de inversión del proceso.

Para poder incluir estos microorganismos se debe hacer una inoculación, donde a partir de un sustrato de agar de triptona de soja y un agar de peptona de 500 gr cada uno observados en la Figura 42, así los microorganismos tendrán un medio de cultivo donde crecerán.

Figura 42

Medios de cultivo



Nota: En la presente figura se observan los medios de cultivo en el que se debe inocular los microorganismos, al lado izquierdo se encuentra el agar de triptona de soja y al lado derecho se encuentra el agar de peptona. La imagen izquierda tomada de [96] “Soja Triptona (TSA), Agar (Ph. Eur.) (Placa de Contacto) para microbiología.” [https://itwreagents.com/united-states/es/product/soja+triptona+\(tsa\),+agar+\(ph.+eur.\)+\(placa+de+contacto\)+para+microbiología/433819](https://itwreagents.com/united-states/es/product/soja+triptona+(tsa),+agar+(ph.+eur.)+(placa+de+contacto)+para+microbiología/433819) (accessed Jun. 02, 2022). y la imagen derecha Tomado de [97] “Agua de Peptona (Medio Deshidratado) para microbiología.” https://www.itwreagents.com/united-states/es/product/m_deshidratadoagua+de+peptona+%28medio+deshidratado%29+para+microbiología/413794 (accessed Jun. 02, 2022).

Para poder hacer una inoculación efectiva se debe hacer cambio del medio semisólido a líquido en un matraz cónico Erlenmeyer de 2L de vidrio de borosilicato de la marca Academy 0W-3Y2K que se observa en la Figura 43, acompañado de un tapón de caucho.

Figura 43

Erlenmeyer de 2L de vidrio de borosilicato



Nota: En la presente figura se observa el Erlenmeyer donde se debe llevar el medio líquido para realizar la inoculación. Tomada de [100] “Academy 0W-3Y2K - DQCF-FBA Cónico Matraz Erlenmeyer 2L 2000ML de vidrio de borosilicato eBay.” <https://www.ebay.com/itm/363419096106?hash=item549d77542a:g:Z-AAAOSw5-RgtmjX> (accessed Jun. 02, 2022)

Debido a que los microorganismos son de tipo aerobio, se debe garantizar un buen suministro de aire el cual se puede generar por medio de una bomba de pecera que se observa en la Figura 44, la cual debe estar conectada a un filtro de aire para evitar que las impurezas lleguen al matraz.

Figura 44

Bomba de pecera



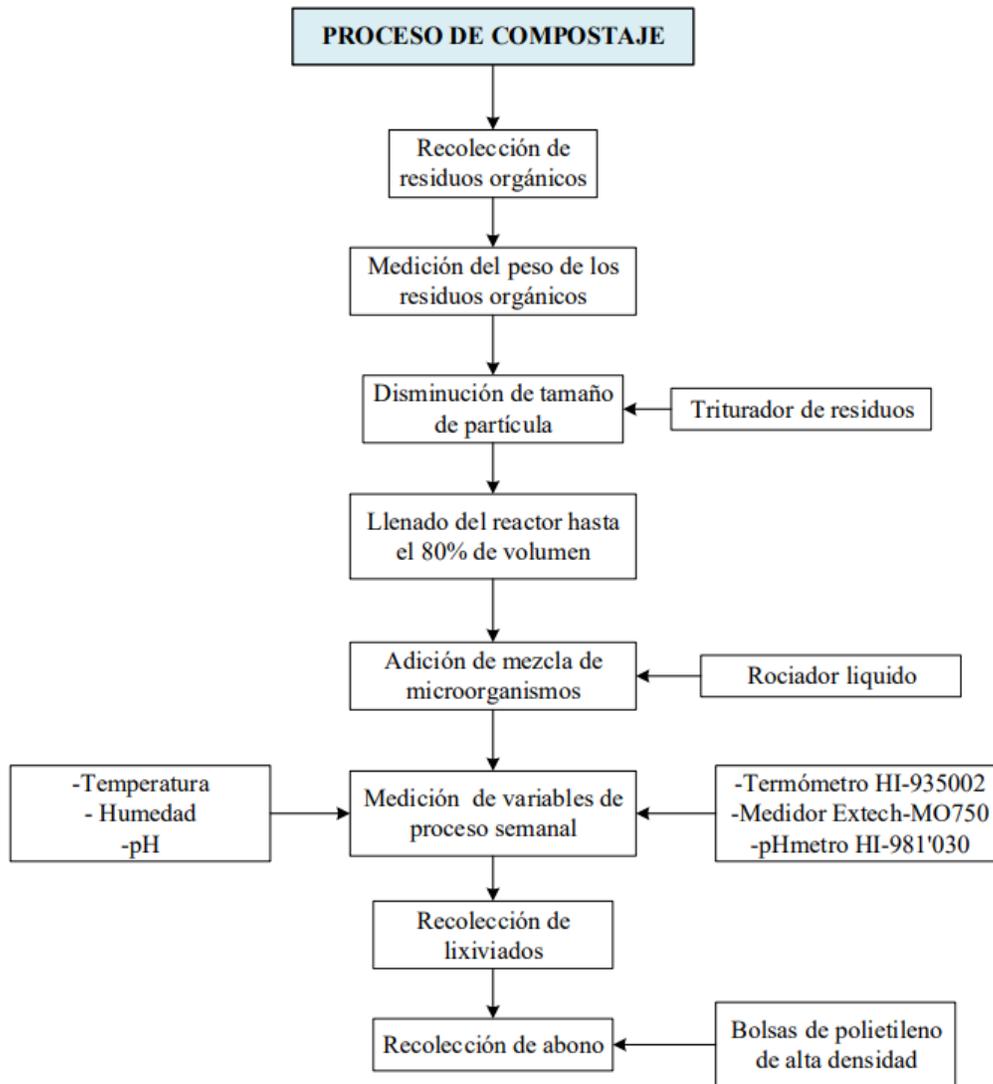
Nota: En la presente figura se observa la bomba de pecera de 10 W, que permitirá obtener la aireación adecuada para los microorganismos. Tomado de [103] “Amazon.com: PULACO Bomba sumergible de 10 W 160 GPH con tubo de 3.3 pies para acuarios, pecera, fuente de estanque, estatuaria, hidroponía, característica de agua, fuentes de interior: Productos para Animales.” <https://www.amazon.com/sumergible-acuarios-estatuaria-hidroponia-caracteristica>. (accessed Jun. 02, 2022)

De esta manera se obtendrá una buena fermentación de los microorganismos para ser adicionado a el sustrato, en este caso los residuos orgánicos y proceder con una mezcla. A partir de esto se puede continuar con el proceso de compostaje como ya se explicó anteriormente.

Para que el operario sepa los pasos a seguir se diseñó un diagrama en donde se puede observar el procedimiento a seguir en la Figura 45, y de igual forma se diseñó una planilla donde debe registrar los parámetros que se medirá junto con observaciones, encontrado en el anexo 7.

Figura 45

Diagrama de flujo del proceso



Nota: En la figura se observa el diagrama de flujo que debe seguir el operario para realizar el proceso del compostaje, en donde se incluye la adición de microorganismos.

7. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo experimental se observó que el compostaje es un proceso eficiente para la obtención de abono orgánico a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos, donde se debe controlar la humedad como una de las variables más importantes ya que de ella depende la fase termófila, la cual permite completar la degradación de los residuos, por lo que este valor debe estar entre el 40% – 60%. Así mismo, es importante mantener una buena aireación ya que al ser un proceso aerobio es indispensable la inyección de oxígeno para que la actividad metabólica se mantenga activa permitiendo que el crecimiento de los microorganismos sea adecuado y la degradación de los residuos sea eficiente.

A partir de la caracterización fisicoquímica realizada a la materia prima, la cual fue de 65,67 kg recolectados, se obtuvo como resultado una relación C/N de 21 con un pH de 5,69 y una humedad del 83,1%, lo que indica que esta materia prima tiene las condiciones adecuadas indicadas por la teoría para llevar a cabo el proceso de compostaje de una manera adecuada, a excepción de la humedad que se encuentra por encima del rango establecido, indicando que se debe adicionar material que permita equilibrar este parámetro, en este caso los residuos de poda en un 15% de la materia inicial. Por otro lado, el producto final obtenido fue de 31,7 kg, logrando cumplir con los parámetros fisicoquímicos establecidos por la norma NTC 5167, con un pH de 6,53, una humedad de 31,2%, una relación C/N de 7,86 y un porcentaje de fósforo de 0,99, potasio de 0,91 y hierro de 3772, indicando que es un producto apto para las plantas.

Así mismo, al analizar la adición de microorganismos en el proceso se pudo concluir que es eficiente para disminuir el tiempo del compostaje, ya que al tener las propiedades adecuadas de la materia orgánica al inicio y agregando el inóculo durante el proceso se puede aumentar la tasa de degradación de los residuos orgánicos y en ciertos casos mejorar la calidad del producto final, el cual va a permitir el cumplimiento de los parámetros establecidos en la normativa nacional para abonos orgánicos.

Finalmente, para llevar a cabo el proceso es necesario realizar una inversión de 13.675.464, y si se desea incluir los microorganismos es de 17.706.778, teniendo en cuenta que es decisión del conjunto si se desea vender el producto en presentaciones de 1 kg a 4.000 pesos colombianos, y así obtener ganancias de este aparte de disminuir gastos en abono para las zonas verdes de conjunto.

RECOMENDACIONES

Para llevar a cabo un buen proceso de compostaje, se sugiere capacitar al operador, con el fin de conocer sobre el proceso e identificar que deben hacer en caso de que alguna variable del proceso salga de su rango operativo (pH, temperatura, humedad)

Se sugiere realizar campañas de sensibilización con el fin de que las personas conozcan el valor agregado que tienen los residuos orgánicos residenciales para convertirse en abono orgánico, todo esto con el fin de ayudar al medio ambiente y generar ganancias adicionales que favorecen al conjunto.

Para disminuir el tiempo que lleva a cabo el proceso del compostaje, se recomienda adicionar los microorganismos propuestos, los cuales permiten acelerar el proceso de degradación de los residuos y mejorar las características de algunos nutrientes del producto final.

Para disminuir costos, se recomienda buscar las cepas que se necesitan para hacer la inoculación de los microorganismos en Colombia ya que se podrían conseguir en menor precio y tiempo.

Poner en marcha el proceso de compostaje con la adición de microorganismos con el fin de aprovechar la mayor cantidad de residuos orgánicos generados por el conjunto y así disminuir los costos variables asociados a el servicio de aseo que deben ser pagados por los residentes mensualmente, ya que estos costos se calculan en base a la cantidad de residuos generados por el total de las viviendas, por lo tanto, a menor cantidad de residuos el valor facturado mensual será reducido.

Realizar compostaje en el conjunto residencial brinda una alternativa a el uso de servicios externos que hacen aprovechamiento de residuos, ya que estos cobran una tarifa para recolectar los residuos orgánicos y los disponen posteriormente quedándose con todo el producto final, es por esto que se debe hacer uso del conjunto como medio de recolección, aprovechamiento y disposición final con el fin de ahorrar esta cantidad mencionada, hacer uso del abono orgánico y obtener ganancias adicionales.

Rectificar una mezcla que sea rica tanto vegetales, frutas y poda para obtener una buena relación de C/N desde el principio y poder cumplir con todos los parámetros requeridos durante el proceso, así obtener un abono rico en nutrientes que favorezca las plantas.

Se recomienda estimar un tiempo de dos meses antes de iniciar el proceso de compostaje, en donde se tengan lista la materia prima y todos los materiales necesarios para llevar a cabo el proceso, y los últimos 3 días, antes de cumplirse los dos meses, iniciar la recolección de los residuos para empezar a tiempo el trabajo.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] N. Martínez and P. Gonzales, “Guía Técnica Para el Aprovechamiento de Residuos Orgánicos,” *Grup. Investig. Sist. Integr. Prod. Agrícola y For.*, p. 159, 2018, [Online]. Available: http://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf
- [2] “El aprovechamiento de los residuos orgánicos resolvería muchos problemas ambientales y crearía empleo | ISTAS.” <https://istas.net/el-aprovechamiento-de-los-residuos-organicos-resolveria-muchos-problemas-ambientales-y-crearia> (accessed Mar. 17, 2022).
- [3] C. B. Flores, “La problemática de los desechos sólidos ,” vol. 27, pp. 121–144, 2009.
- [4] G. Jaramillo, H. Liliana, and M. Zapata Márquez, “APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN COLOMBIA”.
- [5] L. Ramirez, “Residuos solidos urbanos .,” pp. 1–34, 2005, [Online]. Available: <http://todosobreelmedioambiente.jimdo.com/residuos-solidos/>
- [6] “Qué son los residuos comerciales | Reciclaje electrónico y gestión de RAEE.” <https://ecolec.es/informacion-y-recursos/tipos-de-residuos/comerciales/> (accessed Mar. 23, 2022).
- [7] C. Sesma, “Guía para la gestión de los residuos en la empresa,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [8] R. G. Coronado and R. L. Valencia, “Gestión Integral de Residuos Agrícolas para la generación de materias primas en el municipio de Cota Cundinamarca.” p. 121, 2015, [Online]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3001>
- [9] M. Gómez, “Biomasa, Gasificación y Residuos Forestales,” *Residuos For.*, p. 40, 2008.
- [10] SES, “Gestión de residuos en centros sanitarios guía básica Servicio Extremeño de Salud,” 2016, [Online]. Available: <http://www.areasaludplasencia.es/wasp/pdfs/7/715001.pdf>
- [11] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), S. N. de Minería, Empresa Nacional de Minería, and Ministerio de Minería de Chile, “Manejo de mineral y residuos mineros,” *Guías Operación para la Pequeña Minería*, vol. 1, p. 16, 2014.

- [12] M. R. Ortega, “Residuos Radiactivos,” *Elem. radioprotección*, vol. Tomo I, pp. 1–9, 2003.
- [13] (Comisión para la Cooperación Ambiental). CCA, *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte. Informe sintético*. 2017. [Online]. Available: <http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>
- [14] M. O. Suárez, “Manual para el manejo de los Residuos Sólidos Orgánicos e Inorgánicos,” p. 23, 2014, [Online]. Available: http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/GESTIÓN AMBIENTAL/GA_CN_1904_1999.pdf
- [15] J. E. Llano Zapata, “Guía para la gestión integral de residuos peligrosos,” *Memorias histórico, físicas, crítico, Apol. la América Merid.*, pp. 143–411, 2016, doi: 10.4000/books.ifea.4989.
- [16] “Clasificación de los residuos en la Universidad | Servicio Gestión de Residuos.” <https://servicios.unileon.es/gestion-de-residuos/clasificacion-de-los-residuos-en-la-universidad/> (accessed Mar. 23, 2022).
- [17] C. D. L. R. Sólidos, “Clasificación De Los Residuos Sólidos 1 .”.
- [18] E. Rondon, T., N. M. Szantó, J. F. Pacheco, E. Contreras, and G. A., “Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios,” *Manuales la CEPAL*, p. 209, 2016, [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>
- [19] P. Tello, D. Campani, and R. Diana, “GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS,” *AIDIS*, p. 203, 2018.
- [20] Ministerio de ambiente y medio rural marino, “Manual de compostaje casero,” *Amigos la tierra*, no. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, p. 21, 2010, [Online]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/manual_de_compostaje_2011_paginas_1-24_tcm7-181450.pdf%0Apapers3://publication/uuid/B3A2C71D-750D-488A-952C-C3C22FBB9173
- [21] MINAN, “ANEXO 4 Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos Conocimientos científicos básicos,” pp. 1–6, 2018.

- [22] Food and agriculture organization, *Manual de compostaje del agricultor*. 2013. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- [23] C. P. C. Sánchez, “Resolucion No. 00150,” *Auton. Indígena*, vol. 00150, no. 00150, pp. 221–223, 2021, doi: 10.2307/j.ctv7fmfgm.11.
- [24] N. Engineering, “Chapter 2 Composting,” no. February, 2000.
- [25] EPA, “Types of Composting and Understanding the Process | US EPA.” <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/types-composting-and-understanding-process> (accessed Mar. 28, 2022).
- [26] H. Insam and M. de Bertoldi, “Chapter 3 Microbiology of the composting process,” *Waste Manag. Ser.*, vol. 8, pp. 25–48, 2007, doi: 10.1016/S1478-7482(07)80006-6.
- [27] H. Garrett, *Compost*. 2021. doi: 10.7560/728479-003.
- [28] A. L. Meena, M. Karwal, D. Dutta, and R. P. Mishra, “Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting,” *Agric. Food*, vol. 3, no. 1, pp. 85–90, 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.13546.95689.
- [29] D. Sztern and M. Pravia, “Manual Para La Elaboracion De Compost Bases Conceptuales Y Procedimientos,” 2012.
- [30] E. Stentiford and M. de Bertoldi, “Composting: Process,” *Solid Waste Technol. Manag.*, vol. 2, pp. 513–532, 2010, doi: 10.1002/9780470666883.ch34.
- [31] “The Science of Composting,” *Sci. Compost.*, pp. 1–26, 2006, doi: 10.1007/978-94-009-1569-5.
- [32] E. Ramos Agüero, David; Terry Alfonso, “Generalidades de los Abonos Orgánicos: Importancia del Bokashi como alternativa nutricional para suelos y plantas,” *Cultiv. Trop.*, vol. 35, pp. 52–59, 2014, Accessed: Apr. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193232493007>
- [33] N. Técnica, T. A. Colombiana, C. Requisitos, and T. Requisitos, “PRODUCTOS PARA LA INDUSTRIA AGRICOLA PRODUCTOS ORGANICOS USADOS COMO ABONO O FERTILIZANTES Y ENMIENDAD DE SUELO,” 2004.

- [34] F. Molano Camargo, “El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá,” *Hist. Crítica*, vol. 74, pp. 127–149, 2019, [Online]. Available: <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.7440/histcrit74.2019.06>
- [35] F. M. Camargo, “Bogotá’s doña juana landfill: The political production of a toxic landscape, 1988-2019,” *Hist. Crit.*, vol. 2019, no. 74, pp. 127–149, 2019, doi: 10.7440/HISTCRIT74.2019.06.
- [36] DANE, “Población - Bogotá Cómo Vamos,” 2018. <https://bogotacomovamos.org/datos/poblacion/> (accessed Mar. 30, 2022).
- [37] W. Spark, “El clima en Bogotá, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia).” <https://es.weatherspark.com/y/23324/Clima-promedio-en-Bogotá-Colombia-durante-todo-el-año> (accessed Apr. 17, 2022).
- [38] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Bosa » Observatorio Ambiental de Bogotá.” <https://oab.ambientebogota.gov.co/localidades/bosa/> (accessed Apr. 17, 2022).
- [39] B. Carrera, “Plan ambiental local Bosa,” no. 61, pp. 1–95.
- [40] T. D. E. Contenido, “Informe Plan Maestro Integral de Residuos Sólidos – PMIRS 2020,” 2020.
- [41] C. E. Otálora, “Ciudad Limpia,” no. 285, 2022.
- [42] “Conjunto Residencial Camino Dela Esperanza - Google Maps.” <https://www.google.com.co/maps/place/Conjunto+Residencial+Camino+Dela+Esperanza/@4.6106244,-74.20591,309m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e3f9e17f7077d61:0x2f47fc029d535d2c!8m2!3d4.6106189!4d-74.2059577> (accessed Apr. 17, 2022).
- [43] “esperanza.jpg.” <http://iv3arquitectura.com/wp-content/uploads/2014/10/esperanza.jpg> (accessed Apr. 18, 2022).
- [44] J. Ignacio and M. Luna, “LINEAMIENTO PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS FUNDAMENTADOS EN LAS TIC. CASO DE ESTUDIO ANAPOIMA, CUNDINAMARCA.,” 2019.

- [45] D. T. D. E. Soporte, “PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL,” 2020.
- [46] J. Flores, “Estudio de caracterización de los residuos sólidos,” *Munic. Dist. Las Lomas*, vol. 1, p. 104, 2009, [Online]. Available: http://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/elibros_internet/55777.pdf
- [47] B. E. Tituaña Morocho, “ELABORACIÓN DE COMPOST MEDIANTE LA INOCULACIÓN DE TRES FUENTES DE MICROORGANISMOS A TRES DOSIS,” *Pap. Knowl. .*, vol. 7, no. 2, pp. 107–15, 2009.
- [48] MAyA Ecuador, “Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales,” pp. 1–79, 2020, [Online]. Available: www.ambiente.gob.ec
- [49] “pilas estaticas aireadas.jpg (706×342).” <https://docplayer.es/docs-images/74/70045146/images/17-4.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).
- [50] J. M. Alvarez de la Puente, “Compostaje para Agricultura Ecológica,” *Compost. para Agric. Ecol.*, no. February 2010, p. 49, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.20182.24647.
- [51] “pila dinamica.jpg (643×456).” <https://docplayer.es/docs-images/89/98232819/images/132-5.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).
- [52] “Compostador_de_jardín.jpg (4034×2678).” https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Compostador_de_jardín.jpg (accessed Apr. 19, 2022).
- [53] “Compostador-de-dos-pisos-con-bidones.jpg (640×367).” <https://ecoinventos.com/wp-content/uploads/2015/07/Compostador-de-dos-pisos-con-bidones.jpg> (accessed Apr. 19, 2022).
- [54] C. A. Romero Batallán, “Doc Aprovechamiento Integral De Lixiviados,” pp. 1–742, 2010.
- [55] M. Eljaiek, L. Torres, and W. Bermudez, “Alternativas de tratamiento de lixiviados aplicables al relleno sanitario parque ambiental Loma de Los Cocos de la Ciudad de Cartagena,” *SciELO*, pp. 3–8, 2018, [Online]. Available: <http://www.redisa.net/doc/artSim2013/TratamientoYValorizacionDeResiduos/Alternativas Tratamiento Lixiviados Vertedero Colombia.pdf>

- [56] C. A. Romero Batallán, “Aprovechamiento Integral De Lixiviados,” pp. 1–742, 2010.
- [57] K. Palaniveloo *et al.*, “Food waste composting and microbial community structure profiling,” *Processes*, vol. 8, no. 6, pp. 1–30, 2020, doi: 10.3390/pr8060723.
- [58] F. Laich, “El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje.,” *Jorn. Técnica Fertil. y Calid. del Suelo*, vol. 2, no. 38270, pp. 174–183, 2011.
- [59] E. Peña, “Aplicación de bacterias ácido lácticas para acelerar la descomposición de residuos sólidos orgánicos domiciliarios en el centro de compostaje Yencala Bogginao – Lambayeque,” *Ucv*, pp. 0–116, 2017.
- [60] C. De la Peña, “Microorganismos eficientes en la producción de compost con pollinaza en el Rio Negro.,” *Repos. Inst. UNCP*, p. 61, 2019, [Online]. Available: [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/5298/De la Peña.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/5298/De%20la%20Pe%C3%B1a.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [61] F. Pérez Rojas, J. León Quispe, and N. Galindo Cabello, “Actinomicetos aislados del compost y su actividad antagonista a fitopatógenos de la papa (*Solanum tuberosum* spp. andígena Hawkes),” *Rev. Mex. Fitopatol.*, vol. 33, no. 2, pp. 116–139, 2015.
- [62] A. D. Camacho, L. Martínez, and H. R. Saad, “Potencial De Algunos Microorganismos En El Compostaje De Residuos Sólidos,” *Terra Latinoam.*, vol. 32, no. 4, pp. 291–300, 2014.
- [63] et al Cariello, “Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos,” *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, vol. 7, no. 3, pp. 26–37, 2007.
- [64] G. N. Alarcon Prieto, Jose David; Gordillo Rangel, Yeferson Alexis; Rivera Llanos, “OPTIMIZACION DEL PROCESO DE COMPOSTAJE MEDIANTE LA INTRODUCCION DE UN ABONO MICROBIAL QUE CONTIENE *Streptomyces* sp, *Aspergillus niger* y *Lactobacillus* sp.,” *Sci. Compost.*, pp. 1–79, 2019.
- [65] J. Niu and X. Li, “Effects of Microbial Inoculation with Different Indigenous *Bacillus* Species on Physicochemical Characteristics and Bacterial Succession during Short-Term Composting,” *Fermentation*, vol. 8, no. 4, p. 152, 2022, doi:

10.3390/fermentation8040152.

- [66] R. Barrena, E. Pagans, G. Faltys, and A. Sánchez, “Effect of inoculation dosing on the composting of source-selected organic fraction of municipal solid wastes,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, no. 3, pp. 420–425, 2006, doi: 10.1002/jctb.1418.
- [67] I. Pan, B. Dam, and S. K. Sen, “Composting of common organic wastes using microbial inoculants,” *3 Biotech*, vol. 2, no. 2, pp. 127–134, 2012, doi: 10.1007/s13205-011-0033-5.
- [68] E. Vasquez de Diaz, M. Cristina; Lopez, Andrea; Fuentes, Beatriz; Cote, “Aceleracion del proceso de compostaje de residuos post-cosecha (pulpa) del cafe con la aplicacion de microorganismos nativos.,” 2010.
- [69] J. Li *et al.*, “Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting,” *3 Biotech*, vol. 10, no. 3. 2020. doi: 10.1007/s13205-020-2127-4.
- [70] F. Özdemir Koçak and L. Değirmenci, “Extreme Processing Conditions Applied in Selection of Different Microorganisms Utilized as Compost Enhancers,” *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Derg.*, vol. 5, no. 3, pp. 209–221, 2018, doi: 10.19159/tutad.407623.
- [71] C. V. Patricia Martinez, Gustavo Garcia, Germán Sánchez, “Evaluacion preliminar de activadores biologicos para el compostaje de residuos de tomate,” *Planta*, vol. 8, no. 1, pp. 44–56, 2007.
- [72] M. P. Raut, S. P. M. Prince William, J. K. Bhattacharyya, T. Chakrabarti, and S. Devotta, “Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste - A compost maturity analysis perspective,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 14, pp. 6512–6519, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.11.030.
- [73] G. A. Silva, S. De, and S. Futuro, “DINAMICA EN LA PRODUCCION DE COMPOST CON ADICION DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN UN BIORREACTOR,” pp. 6–17.
- [74] M. C. Vargas-García, F. Suárez-Estrella, M. J. López, and J. Moreno, “Effect of inoculation in composting processes: Modifications in lignocellulosic fraction,” *Waste Manag.*, vol. 27, no. 9, pp. 1099–1107, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.06.013.

- [75] A. Singh and S. Sharma, "Composting of a crop residue through treatment with microorganisms and subsequent vermicomposting," *Bioresour. Technol.*, vol. 85, no. 2, pp. 107–111, 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(02)00095-0.
- [76] R. Kumar, D. Verma, B. L. Singh, U. Kumar, and Shweta, "Composting of sugar-cane waste by-products through treatment with microorganisms and subsequent vermicomposting," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 17, pp. 6707–6711, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.111.
- [77] C. Gou, Y. Wang, X. Zhang, Y. Lou, and Y. Gao, "Inoculation with a psychrotrophic-thermophilic complex microbial agent accelerates onset and promotes maturity of dairy manure-rice straw composting under cold climate conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 243, pp. 339–346, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.06.097.
- [78] B. Xi, G. Zhang, and H. Liu, "Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste," *J. Hazard. Mater.*, vol. 124, no. 1–3, pp. 165–172, 2005, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.04.026.
- [79] J. Xu, Z. Jiang, M. Li, and Q. Li, "A compost-derived thermophilic microbial consortium enhances the humification process and alters the microbial diversity during composting," *J. Environ. Manage.*, vol. 243, no. April, pp. 240–249, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.008.
- [80] M. A. Abdel-Rahman, M. Nour El-Din, B. M. Refaat, E. H. Abdel-Shakour, E. E. D. Ewais, and H. M. A. Alrefaey, "Biotechnological Application of Thermotolerant Cellulose-Decomposing Bacteria in Composting of Rice Straw," *Ann. Agric. Sci.*, vol. 61, no. 1, pp. 135–143, 2016, doi: 10.1016/j.aos.2015.11.006.
- [81] B. Formowitz, F. Elango, S. Okumoto, T. Müller, and A. Buerkert, "The role of 'effective microorganisms' in the composting of banana (*Musa ssp.*) residues," *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol. 170, no. 5, pp. 649–656, 2007, doi: 10.1002/jpln.200700002.
- [82] L. Wan *et al.*, "Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw," *Bioresour. Technol.*, vol. 301, no. January, p. 122730, 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122730.

- [83] “Precios Lamina Acero Inoxidable lo que necesitas en tus proyectos.”
<http://aceroinoxidablee.com/precios-lamina-acero-inoxidable> (accessed Jun. 10, 2022).
- [84] “BOLSA POLIETILENO TTE 6"x10" (15cmx25cm) PAQ 100 UND Ref-Bel-025.”
<https://www.belplasticos.com/productos/bolsa-poli-etileno-tte-6x10-15cmx25cm-paq-100-und-ref-bel-025/?variant=307142125> (accessed Jun. 10, 2022).
- [85] “SELLADORA MANUAL DE BOLSA 110V BOLSA 300W(07382-PFS-300) - Ferrolaganga.” <https://ferroelectricoslaganga.com/tiendaonline/es/inicio/792-selladora-manual-de-bolsa-110v-bolsa-300w07382-pfs-300.html> (accessed Jun. 01, 2022).
- [86] “HI 981030 Medidor de pH para suelos GroLine | HANNA Instruments Colombia.”
<https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-981030-medidor-de-ph-para-suelos-groline> (accessed Jun. 01, 2022).
- [87] “Termómetro digital Hanna Instruments HI 935002, con 2 canales para sondas tipo K | RS Components.” <https://es.rs-online.com/web/p/termometros-digitales/5066572> (accessed Jun. 01, 2022).
- [88] “Amazon.com: REOTEMP Medidor de humedad de jardín y compost (vástago de 15 pulgadas), herramienta de jardín ideal para pruebas de humedad del suelo, planta, granja y césped. : Herramientas y Mejoras del Hogar.” https://www.amazon.com/-/es/REOTEMP-Medidor-humedad-pulgadas-herramienta/dp/B07DM4LS1D/ref=sr_1_13?__mk_es_US=ÅMÅŽÕÑ&crd=2YHX14Q37WCMJ&keywords=soil%2Bmoisture%2Bmeter&qid=1653787623&srefix=medidor%2Bde%2Bhumedad%2Bpara%2Bsuelos%2Caps%2C133&sr=8-13&th=1 (accessed Jun. 01, 2022).
- [89] “Triturador De Residuos Organicos Jtr200 - Homecenter.com.co.”
<https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/54348/triturador-de-residuos-organicos-jtr200/54348/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [90] “Bacillus mucilaginosus.” <https://www.dsmz.de/collection/catalogue/details/culture/DSM-24461> (accessed May 27, 2022).
- [91] “Bacillus azotofixans.” <https://www.dsmz.de/collection/catalogue/details/culture/DSM->

- 5976 (accessed May 27, 2022).
- [92] “Bacillus megaterium.” <https://www.atcc.org/products/14581> (accessed May 27, 2022).
- [93] “Streptomyces cellulosa.”
<https://www.dsmz.de/collection/catalogue/details/culture/DSM-40362> (accessed May 27, 2022).
- [94] “Trichoderma koningii.” <https://www.dsmz.de/collection/catalogue/details/culture/DSM-63059> (accessed May 27, 2022).
- [95] “refrigerador compacto portátil AC/DC.” https://www.amazon.com/-/es/dp/B08G54RG9P/ref=vp_d_pb_TIER2_sessmp_lp_B07S2RBCT5_pd?_encoding=UTF8&pf_rd_p=75700fec-c20b-4d28-b431-6cef6ff05a7f&pf_rd_r=F7260676P2VK1ACTGW7Z&pd_rd_wg=xTY63&pd_rd_i=B08G5575X6&pd_rd_w=FoezC&content-id=amzn1.sym.75700fec-c20b (accessed May 27, 2022).
- [96] “Soja Triptona (TSA), Agar (Ph. Eur.) (Placa de Contacto) para microbiología.”
[https://itwreagents.com/united-states/es/product/soja+triptona+\(tsa\),+agar+\(ph.+eur.\)+\(placa+de+contacto\)+para+microbiología/433819](https://itwreagents.com/united-states/es/product/soja+triptona+(tsa),+agar+(ph.+eur.)+(placa+de+contacto)+para+microbiología/433819) (accessed Jun. 02, 2022).
- [97] “Agua de Peptona (Medio Deshidratado) para microbiología.”
https://www.itwreagents.com/united-states/es/product/m_deshidratadoagua+de+peptona+%28medio+deshidratado%29+para+microbiología/413794 (accessed Jun. 02, 2022).
- [98] “Caja petri vidrio cal soda 100 x 15mm.” <https://www.lbpro.co/339-caja-petri-vidrio-cal-soda-100x15mm-steriplan-autoclavables-121c.html> (accessed May 27, 2022).
- [99] “Asas siembra esteril azul.” <https://www.labotienda.com/es/productos-laboratorio/asas-siembra-esteril-azul-ce-ivd-cap-10-1-b-20/>
- [100] “Academy 0W-3Y2K - DQCF-FBA Cónico Matraz Erlenmeyer 2L 2000ML de vidrio de borosilicato | eBay.”
<https://www.ebay.com/itm/363419096106?hash=item549d77542a:g:Z-AAAOSw5->

RgtmjX (accessed Jun. 02, 2022).

- [101] “Tapones de goma de fermentación para uso con tapon de goma.” https://www.amazon.com/-/es/Tapones-goma-fermentación-para-tapón/dp/B09N44NJJS/ref=zg_bs_393458011_5/136-0454318-9458235?pd_rd_i=B09QH8MBZR&psc=1 (accessed May 27, 2022).
- [102] “YXQ 20Ft Silicone Tubing Hose 6mm ID 9mm OD Rubber Flexible 1.5mm Thickness Translucent Tube Pipe Water Air for Pump Transfer.” https://www.amazon.com/-/es/dp/B07PLXYJGS/ref=sr_1_2?__mk_es_US=ÅMÅŽÕÑ&crd=SEUKCREIV0HP&keywords=lab+hose&qid=1655077607&srefix=manguera+de+laboratorio%2Caps%2C167&sr=8-2 (accessed May 27, 2022).
- [103] “Amazon.com: PULACO Bomba sumergible de 10 W 160 GPH con tubo de 3.3 pies para acuarios, pecera, fuente de estanque, estatuaria, hidroponía, característica de agua, fuentes de interior : Productos para Animales.” https://www.amazon.com/sumergible-acuarios-estatuaria-hidroponía-característica/dp/B07YLHVZ4Q/ref=sr_1_3_sspa?keywords=pump+for+fish+tank&qid=1654187505&srefix=bomba+para+pe%2Caps%2C152&sr=8-3-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUEzMzZEMeW2M1ZISk1SJM VuY3J5cHRIZElkPUEwNzIzMTU2M09TVzgz4T01ZNUdTMCZlbnNyeXB0ZWRBZEIkPUEwMzA1MjE3MU1TS0g2QkpTOVVQUSZ3aWRnZXROYW1IPXNwX2F0ZiZhY3Rpb249Y2xpY2tSZWRpcmVjdCZkb05vdExvZ0NsaWNrPXRydWU= (accessed Jun. 02, 2022).
- [104] “Aquapapa Filtro de esponja bio para acuario Betta Fry hasta 60 galones de ea. Paquete de 3 (L).” https://www.amazon.com/-/es/Aquapapa-esponja-acuario-galones-Paquete/dp/B07JW88XYV/ref=sr_1_1?__mk_es_US=ÅMÅŽÕÑ&crd=OX5WYTNMG PGZ&keywords=aquarium+air+filter&qid=1655078058&srefix=filtro+de+aire+pecer%2Caps%2C147&sr=8-1 (accessed May 27, 2022).
- [105] “Capitulo3 Condiciones y leyes de semejanza.”

ANEXOS

ANEXO 1

POSTER PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS EN EL CONJUNTO RESIDENCIAL



COMPOSTAJE

EN TU HOGAR

PARTICIPA AHORA PROYECTO DE SOSTENIBILIDAD

RECOLECTA LOS RESIDUOS ORGANICOS QUE PRODUCES DIARIAMENTE EN TU HOGAR Y APOYA A LA PRODUCCIÓN DE ABONO ORGANICO PARA LAS ZONAS VERDES DE NUESTRO CONJUNTO

LOS RESIDUOS QUE PUEDES RECOLECTAR SON:

- RESTOS DE FRUTAS Y VERDURAS
- CASCARAS DE HUEVO
- CASCARAS DE HORTALIZAS (ZANAHORIA, CEBOLLA, AJO, CALABAZA, ETC)

COMPOSTAR REDUCE UN 50% LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EQUIVALENTES AL DIÓXIDO DE CARBONO



Recycle

SI ESTAS INTERESADO EN COLABORAR, PIDE AL GUARDA DE SEGURIDAD LA PLANILLA "PROYECTO DE COMPOSTAJE", DEJA TUS DATOS Y NOSOTROS HACEMOS EL RESTO

ANEXO 2

PRUEBA DE LABORATORIO DE LOS RESIDUOS ORGANICOS.



INFORME DE RESULTADOS

Registro ICA LB0000342021

Control de calidad de fertilizantes,
agritecnologías de suelo y reguladores
fitosanitarios

Vigencia 17 de Nov. de 2021

ÁREA DE ANÁLISIS DE MATERIALES ORGÁNICOS

Informe N°	14081-V1-2022	N° de Laboratorio	AMO-00765-2022	
Información del Cliente				
Remitente	JEAN PIERRE MARTINEZ UREÑA	Responsable	SR. JEAN PIERRE MARTINEZ UREÑA	
Propietario	SR. JEAN PIERRE MARTINEZ UREÑA	Email contacto	sordle215@gmail.com	
Fecha Ingreso	29-04-2022	Fecha Emisión	06-05-2022	
Información de la Muestra Suministrada por el cliente				
Identificación Suministrada	RESIDUOS ORGANICOS RESIDENCIALES	Lote / Bloque	N.S.	
Fuente del Material /	NO ESPECIFICADO	Contrato N°		
Descripción Física	SÓLIDO CAFÉ	Condiciones recepción	CONFORME	
ANÁLISIS PARCIAL MATERIAL ORGÁNICO 3				
Variable	Expresión / Sigla	Resultados	Unidades	Extractante/Técnica/Documento Normativo
Humedad	N.A.	83.1	%	70 °C / Gravimétrico / NTC 5167
pH	pH	5.69	Unidades de pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167
Cenizas	N.A.	3.40	%	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167
Carbono Orgánico Oxidable Total	COOx	5.17	%	Sin. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167
Relación Carbono / Nitrógeno	C/N	21	Adimensional	Relación matemática
CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN MINERAL				
Nitrógeno Total	NT	0.252	%	Sumatoria de Especies de Nitrógeno requeridas por el cliente
Nitrógeno Orgánico	N Orgánico	0.252	%	Micro-Kjeldahl / Volumétrico / NTC 370
Observaciones a los resultados:		Convenciones:		
NINGUNO		N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado / MVH Mineralización Via Húmeda / M.I. Muestra Insuficiente EAA Espectroscopia de Absorción Atómica / EEA Espectroscopia de Emisión Atómica / ICP-OES Espectroscopia de Emisión Óptica de plasma acoplado inductivamente / EAM Extracción Asistida con Microondas		

---- Fin del Reporte de Resultados Analíticos ----

Autorizado por:

Danny Rodríguez Lopez

Subgerente Técnico (E) - Químico - PQ 4261

Revisado por:

Paola Díaz
Coordinador de Área-Química-PQ 3257

---- Fin del Informe ----

ANEXO 3

BALANCE DE MATERIA

Balance de materia para determinar la cantidad de peso inicial para los residuos orgánicos y los residuos de poda.

Balance global

$$M1 + M2 = M3 \quad (1)$$

Balances elementales

$$M1 * C1 + M2 * C2 = M3 * C3 \quad (2)$$

$$M1 * N1 + M2 * N2 = M3 * N3 \quad (3)$$

La relación carbono nitrógeno (C/N) de la corriente de mezcla sería:

$$R = \frac{C}{N} = \frac{C3}{N3} \quad (4)$$

Al realizar la división entre la ecuación (2) y (3) se obtiene la relación carbono nitrógeno (C/N) deseada

$$R = \frac{M1 * C1 + M2 * C2}{M1 * N1 + M2 * N2} \quad (5)$$

Es necesario realizar un aprovechamiento de todos los residuos en su totalidad, por lo cual se realiza el cálculo para obtener la cantidad residuos de poda para el sustrato inicial. La ecuación (6) muestra el despeje para determinar la cantidad de residuos de poda para la realización del proceso de compostaje con una relación carbono nitrógeno (C/N) que se ajuste a el rango optimo del proceso.

$$M2 = \frac{R * M1 * N1 - M1 * C1}{C2 - R * N2} \quad (6)$$

ANEXO 4

MEDICIONES OBTENIDAS DURANTE EL PROCESO DEL COMPOSTAJE

 CAMINO DE LA ESPERANZA	REGISTRO PARA EL CONTROL DE VARIABLES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	Fecha de emisión: <hr/> Versión: 01 Fecha de revisión:
Elaborado por:		Aprobado por:

Producto: _____ Cantidad: _____

Fecha (dd/mm/aa)	Temperatura (°C)	Humedad	pH	Observaciones
19-ene-22	20,00	Nor	5,50	
21-ene-22	19,33	Nor	5,03	
23-ene-22	25,33	wet	5,17	
26-ene-22	26,33	Nor	5,17	Se observan algunas colonias de hongos en la superficie de los residuos orgánicos
28-ene-22	27,00	Wet	5,57	
30-ene-22	28,33	Wet +	5,43	
1-feb-22	24,33	Wet +	5,27	La temperatura disminuyó con respecto al incremento que venía presentando (posible problema con la humedad)
3-feb-22	21,00	Wet +	5,63	
5-feb-22	20,67	Wet	5,13	
7-feb-22	19,00	Wet	5,20	
9-feb-22	19,67	Wet	5,27	
11-feb-22	20,00	Wet	5,93	El valor de temperatura se mantiene constante, la humedad parece no mejorar
13-feb-22	19,33	Wet	5,23	Se realiza adición de residuos de poda, para controlar la humedad y disminuir su valor
15-feb-22	21,33	Wet	5,27	
17-feb-22	22,67	Nor	5,13	
19-feb-22	24,67	Nor	5,57	
21-feb-22	27,33	Nor	5,63	Se observa la aparición de moscas de la fruta
23-feb-22	30,33	Nor	5,20	
25-feb-22	35,67	Wet	5,27	
27-feb-22	39,33	Nor	5,13	Se evidencia un aumento en la temperatura por encima de 40 °C lo que indica que la adición de residuos de poda ha sido efectiva
1-mar-22	42,33	Nor	5,27	
3-mar-22	45,33	Nor	6,27	
5-mar-22	46,33	Wet	6,27	
7-mar-22	48,33	Nor	6,37	
9-mar-22	50,33	Wet	6,50	
11-mar-22	51,67	Nor	6,70	
13-mar-22	52,67	Nor	6,83	
15-mar-22	52,33	Wet	7,13	
17-mar-22	53,67	Nor	7,23	
19-mar-22	54,67	Nor	7,47	
21-mar-22	55,67	Nor	7,83	Las propiedades organolépticas de los residuos han cambiado (olor, color) y su volumen ha disminuido considerablemente

23-mar-22	56,33	Nor	8,03	
25-mar-22	55,67	Nor	8,27	
27-mar-22	56,67	Wet	8,03	
29-mar-22	57,67	Nor	7,90	
31-mar-22	57,33	Nor	8,23	
2-abr-22	58,67	Wet	8,43	
4-abr-22	58,33	Nor	7,73	
6-abr-22	60,33	Nor	7,63	
8-abr-22	60,67	Nor	7,60	
10-abr-22	61,67	Nor	7,57	
12-abr-22	63,67	Wet	7,47	
14-abr-22	64,67	Nor	7,70	
16-abr-22	67,33	Wet	7,53	
18-abr-22	64,33	Nor	7,57	Se puede identificar que el pico maximo para la fase termofila fue de 67,33 °C y es posible que a partir de ahora la temperatura empiece a descender
20-abr-22	59,67	Nor	7,53	
22-abr-22	57,33	Nor	7,57	
24-abr-22	52,67	Wet	7,27	
26-abr-22	48,67	Nor	7,10	
28-abr-22	42,67	Nor	7,23	
30-abr-22	31,33	Nor	7,37	
2-may-22	27,67	Wet	7,47	La temperatura se esta acercando a la ambiental, indicando que el proceso esta llegando a su fin
4-may-22	27,33	Nor	7,17	
6-may-22	26,33	Nor	7,00	
8-may-22	23,67	Nor	6,93	El producto final se ve granulometrico, con algunas cascara de huevo y residuos de poda sin descomponer
10-may-22	23,33	Nor	7,03	
12-may-22	22,67	Nor	6,87	Se da fin al proceso de compostaje ya que ha pasado una semana con temperatura constante cercana a la ambiental

ANEXO 5

RESULTADOS DE LABORATORIO DEL ABONO.

REPORTE DE ANÁLISIS No. 48 SUSTRATOS

Laboratorio de Aguas y Suelos
Facultad de Ciencias Agrarias
Sede Bogotá



INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE			
Fecha recibo:	24/05/2022	Recibo de pago:	20810
Nombre:	JeanpierreMartinez	Identificación:	no especifica
Dirección:	no especifica	Teléfono:	3057235344
Email:	sordie215@gmail.com	Ciudad:	no especifica

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Finca:	no especifica	Cultivo:	no especifica
Propietario:	no especifica	Lote:	compost
Municipio:	no especifica	Departamento:	no especifica

n.s.: No solicitado, Pend: Pendiente

RESULTADOS									
Código	Lote	pH	Hum. 70°C	CT	NT	P	K	Fe	C/N
6	compost	6,53	31,2	15,3	1,95	0,99	0,91	3772	7,86

Nota: Estos resultados son válidos unicamente para las muestras entregadas por el usuario al laboratorio

MÉTODOS			
Nombre Variable	Método	Determinación	Unidades
pH	Suspensión en agua (saturación)	Potenciometría	-
Hum. 70°C: Humedad	Secado a 70°C durante 24 horas	Gravimetría	%
CT: Carbono total	Análisis elemental	-	%
NT: Nitrógeno total	Análisis elemental - Dumas	-	%
P: Fósforo total	Método del fosfomolibdo-vanadato	Colorimetría	%
Ca, K, Mg, Na: Bases - elementos mayores	Calcinación a 600°C; digestión ácida con HCl	Absorción atómica - Llama	%
Cu, Fe, Mn, Zn: Menores totales	Calcinación a 600°C; digestión ácida con HCl	Absorción atómica - Llama	mg/kg
C/N: Relación carbono-nitrógeno	Calculado a partir del carbono y nitrógeno	-	-

RECUERDE: El plan de fertilización es más eficiente si Ud consulta con el profesional de Asistencia Técnica de su localidad

Observaciones: No reporta

Realizó: Álvaro Jiménez T. (Qco)
Coordinador Técnico.

Aprobó: Prof. Jaime Torres Bazurto
Coordinador de laboratorio.

Está prohibida la reproducción total o parcial de este reporte sin previa autorización escrita del laboratorio

ANEXO 6

CALCULO DEL DIAMETRO Y LARGO DE REACTOR

El volumen del reactor es fundamental para conocer las dimensiones del mismo, este valor es hallado a partir del volumen experimental por medio del método de semejanzas. El siguiente calculo muestra el despeje para el diámetro y largo del reactor.

Volumen de un cilindro

$$V = \pi * r^2 * h \quad (1)$$

Relación entre la altura y el diámetro del cilindro

$$h = 1,5 * D \quad (2)$$

Relación entre diámetro y radio

$$D = 2r \quad (3)$$

Reemplazando (2) y (3) en (1)

$$V = \pi * \frac{D^2}{4} * 1,5D \quad (4)$$

Como conclusión, el diámetro del cilindro es

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi * 1,5}} \quad (5)$$

