

**DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A
PARTIR DE LODOS RESIDUALES GENERADOS EN LA PTAR DEL MUNICIPIO DE
FUNZA, CUNDINAMARCA**

AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES

**Proyecto final de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR
FELIPE CORREA MAHECHA
INGENIERO QUÍMICO**

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

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. marzo de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Principalmente agradezco a Dios al ser incondicional y guiarme durante todo este proceso, permitiéndome culminar esta etapa tan importante en mi vida. A mis padres por su apoyo y amor incondicional; a mi mamá por creer en mí, por su compromiso y paciencia, a mi papá por su esfuerzo y compañía logrando que esto se hiciera posible. A Daniel mi hermano por inspirarme con su motivación, ejemplo y fortaleza. A Santiago por estar presente en mi vida y apoyar cada una de mis decisiones. A mis abuelitos que siempre han sido parte fundamental en mi vida y por su infinita incondicionalidad. Finalmente, gracias cada uno por el aliento que me proporcionaron día a día para que este proyecto se lograra.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

A mi director Felipe Correa Mahecha por su paciencia, aportes de conocimiento y experiencia durante el desarrollo de este proyecto.

A la empresa EMAAF ESP, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de grado.

A Raúl Agudelo por su ayuda, gestión y buena actitud con el fin de llevar a cabo este proyecto.

A Camila por su apoyo incondicional, paciencia y disposición con el fin de ayudarme durante todo este proceso.

Las Directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
OBJETIVOS	14
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	17
1.1 Tratamiento de aguas residuales	17
1.2 Producción de lodos residuales	17
1.2.1 Lodo crudo	17
1.2.2 Lodos primarios	17
1.2.3 Lodos secundarios	18
1.2.3 Lodos terciarios	18
1.3 Tratamiento de lodos residuales	18
1.3.1 Espesamiento	18
1.3.2 Estabilización de lodos	19
1.3.3 Deshidratación	19
1.3.4 Desinfección	20
1.3 Clasificación de lodos residuales	20
1.4.1 Aprovechables	20
1.4.2 No aprovechables	21
1.4.3 Peligrosos	21
1.5 Aprovechamiento del lodo residual	21
1.5.1 Aprovechamiento como fertilizante orgánico	21
1.5.2 Aprovechamiento energético	22
1.5.3 Obtención de carbón activado	22
1.5.4 Aprovechamiento como material de construcción	22
1.5.5 Restauración de espacios	22
1.6 Compostaje	22
1.6.1 Condiciones requeridas	23
1.6.2 Fases de compostaje	24
1.7 Tipos de compostaje	25

1.7.1 <i>compostaje aerobio</i>	25
1.7.2 <i>compostaje anaerobio</i>	25
1.8 técnicas de compostaje	26
1.8.1 <i>Sistema abierto</i>	26
1.8.2 <i>Sistema cerrado</i>	27
2. DIAGNOSTICO	30
2.1 Descripción del proceso previo al compostaje	30
2.1.1 <i>Proceso en la planta de tratamiento de aguas residuales</i>	31
2.2 Caracterización del lodo residual	32
2.2.1 <i>Muestreo</i>	32
2.2.2 <i>Caracterización físico-química del lodo</i>	34
2.3 Agentes de carga	36
3. SELECCIÓN DE PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS LODOS	38
3.1 Matriz de selección para el proceso de compostaje	38
3.1.1 <i>Pilas estáticas</i>	38
3.1.2 <i>Pilas por volteo</i>	39
3.1.3 <i>Reactor horizontal</i>	39
3.1.4 <i>Reactor vertical</i>	40
3.2 Desarrollo experimental	42
3.2.1 <i>Construcción de reactores</i>	42
3.2.2 <i>Parametrización de variables iniciales de proceso</i>	46
3.2.3 <i>Método de medición de variables</i>	47
3.3 Acondicionamiento del lugar de trabajo	48
3.4 Adecuación y balance de materiales de compostaje	50
3.5 Desarrollo experimental del proceso de compostaje	52
3.5.1 <i>Descripción inicial del proceso</i>	52
3.5.2 <i>Resultados y análisis de resultados experimentación</i>	53
3.5.3 <i>Balance de componentes en el proceso</i>	66
4. ESCALAMIENTO DEL PROCESO	70
4.1 Reactor rotatorio horizontal	70
4.2 Unidades complementarias	77

4.3 Área del proceso de compostaje	78
5. ANALISIS DE COSTOS DEL PROCESO	80
5.1 Costos de mano de obra	81
5.2 Costos equipos y materiales	82
5.3 Costos directos de producción	83
5.4 Costos indirectos de producción	83
5.5 Evaluación costo/ beneficio	85
6. CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	101

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquemas variables que intervienen en el proceso de compostaje	24
Figura 2. Reactor de tambor giratorio	29
Figura 3. Diagrama de proceso de tratamiento de aguas residuales	30
Figura 4. Lecho de secado de la PTAR municipio de Funza	32
Figura 5. Distribución uniforme de lodo residual	33
Figura 6. Muestra rotulada de lodo residual	34
Figura 7. Metodología para determinación de parámetros físico-químicos	34
Figura 8. Diseño de reactor horizontal de tambor rotatorio	43
Figura 9. Diseño de reactor escala piloto	44
Figura 10. Reactor recubierto con material aislante	45
Figura 11. Localización del montaje experimental en la planta	49
Figura 12. Lugar de montaje experimental	50
Figura 13. Esquema balance de materiales	50
Figura 14. Estado inicial de los reactores	52
Figura 15. Perfil de temperaturas promedio de los reactores	53
Figura 16. Perfil de temperatura de los reactores a profundidad de 10 cm	54
Figura 17. Perfil de temperatura de los reactores a 10 cm de profundidad	55
Figura 18. Perfil de temperatura en los reactores	56
Figura 19. Etapa de maduración de los reactores	57
Figura 20. Larva blanca en muestra de compost	58
Figura 21. Variación de pH en cada reactor durante los días de experimentación.	58
Figura 22. Porcentaje de humedad a través de la experimentación	60
Figura 23. Variación de los sólidos volátiles en los reactores	63
Figura 24. Comportamiento relación C/N en el proceso	65
Figura 25. Contenido inicial y final de compuestos	69
Figura 26. Relación entre dimensiones escala piloto y modelo laboratorio	74
Figura 27. Esquema del reactor	75
Figura 28. Diagrama de bloques del proceso propuesto	76
Figura 29. Ficha técnica trituradora de césped y lodo residual	77

Figura 30. Ficha técnica secador saliente del reactor	78
Figura 31. Ficha técnica tamiz vibratorio	78
Figura 32. Plano de área requerida para el escalamiento	79
Figura 33. Distribución de costos del proyecto en el año	84
Figura 34. Multiparámetro portátil 3630 IDS WTW	103
Figura 35. Termómetro digital de punzón	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales características físico-químicas del lodo	35
Tabla 2. Características del lodo y poda de césped como agente de carga en base húmeda	36
Tabla 3. Cantidades másicas y volumétricas de materia prima producidas	37
Tabla 4. Matriz de selección para el proceso de compostaje	41
Tabla 5. Especificaciones de reactor y soporte	45
Tabla 6. Resumen de condiciones de un proceso de compostaje	46
Tabla 7. Cantidades de lodo y agente de carga empleados en la experimentación	51
Tabla 8. Variables iniciales para la experimentación	52
Tabla 9. Coeficientes de degradación en los reactores	62
Tabla 10. Porcentaje de descomposición en el compostaje	63
Tabla 11. Carbono total y nitrógeno total al final del proceso	66
Tabla 12. Cantidades de carbono estimadas en el proceso de compostaje	68
Tabla 13. Precios del mercado local	80
Tabla 14. Ingresos estimados de la propuesta de compostaje	81
Tabla 15. Costos de mano de obra en la producción	82
Tabla 16. Costos de inversión para el proyecto	82
Tabla 17. Costos directos de producción	83
Tabla 18. Promedio costos indirectos de producción	84
Tabla 19. Costos totales de implementación y operación de un modelo piloto de compostaje en el municipio de Funza Cundinamarca	85
Tabla 20. Promedio de IPC	86
Tabla 21. Costos de operación anual planta piloto de compostaje	87
Tabla 22. Ingresos por ventas de abono orgánico	87
Tabla 23. Flujo de caja proceso compostaje	88
Tabla 24. Costo beneficio del proyecto	88
Tabla 25. Flujo de caja disposición actual	89
Tabla 26. Costo beneficio de la disposición actual	90

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Coeficiente de biodegradabilidad	61
Ecuación 2. Porcentaje de Descomposición	62
Ecuación 3. Factor de escalamiento	71
Ecuación 4. Tasa de calor generado	71
Ecuación 5. Tasa de calor disipado	71
Ecuación 6. Igualación factor de escalamiento	71
Ecuación 7. Definición de igualación factor de escalamiento	72
Ecuación 8. Simplificación igualación escalamiento	72
Ecuación 9. Factor de forma	72
Ecuación 10. Cambio de temperatura requerida laboratorio	73
Ecuación 11. Valor presente neto (VPN)	90

RESUMEN

En la producción de abono orgánico, partiendo del lodo generado en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza-Cundinamarca, se llevó a cabo la caracterización físicoquímica de los lodos obtenidos, para la selección del sistema adecuado se utilizó una matriz multicriterio “*Pugh*”, los criterios evaluados fueron: costos, eficiencia, área requerida y tiempo de retención de la materia. El proceso seleccionado es en reactor horizontal con volteo, donde se requieren agentes de carga para suplir las necesidades en el compostaje, para el diseño del proceso se aplicó el balance de materia que incluye variables como relación C/N y humedad del sistema. Durante la experimentación fueron analizadas las variables de temperatura, humedad, pH y cenizas al inicio y al final del proceso para la materia prima, el abono obtenido fue analizado en laboratorio externo donde se encontró que cumple con los requisitos especificados en la NTC 5167 (2011). Asimismo, para el agente de carga se realizó la caracterización por medio de revisión bibliográfica. Por otro lado, el escalamiento del prototipo a escala piloto de un reactor horizontal fue ejecutado con la finalidad de establecer sus dimensiones y especificaciones técnicas para la producción. En el análisis de costos de operación e inversión se incluyeron criterios como: ingresos, costos directos e indirectos, durante la relación Costo/Beneficio se identificó que el proyecto es viable.

Palabras clave: Compostaje, Sistema aerobio, Reactor horizontal, Lodo residual, Césped.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar un proceso para la producción de abono orgánico mediante compostaje partiendo de lodos obtenidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza, Cundinamarca.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el lodo residual obtenido en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza Cundinamarca.
2. Seleccionar un proceso de compostaje para la producción de abono orgánico
3. Determinar especificaciones técnicas para la producción de abono orgánico
4. Analizar los costos del proceso de compostaje para la producción de abono orgánico

INTRODUCCIÓN

El proceso de compostaje es una herramienta muy efectiva para la degradación de residuos sin causar un gran impacto ambiental, este proceso se lleva a cabo desde nivel laboratorio hasta escalas industriales donde se puede hacer uso de residuos orgánicos los cuales representan del 60% a 70% de los residuos sólidos del país. Generando un producto útil el cual tiene la capacidad de conferir beneficios al ecosistema terrestre más específicamente a los suelos, de igual forma también aporta a la reducción de gases de efecto invernadero, ya que la mayoría de los residuos sólidos por lo general son depositados en botaderos al aire libre los cuales tienen la capacidad de generar infecciones, olores desagradables, proliferación de especies animales y producción de gases precursores de la reducción de ozono, sin embargo el proceso de compostaje genera emisiones en las primeras semanas de proceso debido al aumento de temperatura donde los compuestos se volatilizan. No obstante, la reducción de estos gases es importante debido a que no se emiten directamente al ambiente.

Aun así, en contexto con lo anterior, se genera la idea de un proyecto, el cual tiene como parte central el desarrollo de una propuesta basada en el proceso de compostaje en el cual se pueda producir abono orgánico partiendo de las propiedades presentes y aprovechables en los lodos residuales generados por la PTAR del municipio de Funza, Cundinamarca. El aprovechamiento de los residuos permite contribuir dentro de los esquemas de economía circular a un crecimiento sostenible en el tiempo para el municipio ya que permite optimizar residuos que generen un equilibrio benéfico con la economía local, estimulando el desarrollo de un nuevo modelo industrial el cual tiene la capacidad de fomentar empleo y genera independencia sobre los recursos, donde se pueden reutilizan productos o desechos locales.

Este proceso se lleva a cabo de diferentes maneras donde se emplean espacios para grandes cantidades de residuos llamadas pilas estáticas o aireadas por sistema mecánico, reactores verticales, bio túneles o reactores horizontales como los de tambor rotatorio, el precio de elaboración de cada uno de los mencionados se basa en su complejidad de la implementación.

Durante el proceso de selección del sistema adecuado del proceso, es indispensable la caracterización inicial fisicoquímica del residuo, al igual que de los materiales de carga, los cuales

por lo general son residuos con diferentes características. Para la selección del proceso se revisan diferentes tipos de operación del compostaje a través de matriz de selección, la cual se diseña con el fin de evaluar factores como tiempo de compostaje, eficiencia, salubridad, área requerida, etc.

El proceso seleccionado y propuesto este asociado a un reactor horizontal de tambor rotatorio con aireación. Este proceso es llevado a cabo a escala laboratorio en tanques de polietileno de 60 litros, los cuales se aislaron con espuma de poliuretano con el fin de preservar el calor generado por la actividad microbiana y son aireados manualmente por medio de bases construidas manualmente y aspas incorporadas al interior.

El seguimiento del proceso se realizó por medición de variables importantes como temperatura, pH, humedad y cenizas estas variables fueron medidas dentro del área de experimentación, pero al inicio para la caracterización del material y al final para la caracterización del abono obtenido se realizaron estudios en un laboratorio externo a la institución educativa. Con respecto al escalamiento de la unidad laboratorio a una piloto se emplea un modelo el cual se basa en la tasa de flujo de calor generada por el volumen a compostar con respecto a la tasa de disipación ocurrida a través del área superficial del reactor cumpliendo a su vez el principio de similaridad geométrica.

1. GENERALIDADES

1.1 Tratamiento de aguas residuales

La planta de tratamiento de aguas residuales es una extensión donde se retiran contaminantes del agua, para que esta pueda descargarse de nuevo al ecosistema más cercano sin poner en peligro la salud y el bienestar ambiental. Teniendo en cuenta que las aguas residuales cuentan con un alto índice de contaminantes, entre ellos bacterias, productos químicos y otras toxinas.

1.2 Producción de lodos residuales

Los lodos, actualmente llamados biosólidos en la industria, son el material evacuado del fondo de los tanques de sedimentación primaria y secundaria, de los sistemas de filtración biológica y de algunos tipos de tanques de aireación. Contienen componentes orgánicos del agua residual, así como muchos tipos de microorganismos [1].

En los últimos años, la producción elevada de lodos se ha convertido en un problema para cada PTAR teniendo en cuenta que su disposición es necesaria debido a la problemática ambiental a cuál genera altos costos en las empresas.

1.2.1 Lodo crudo

Lodo crudo, es aquel que no ha sido tratado ni estabilizado, que puede extraerse de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tiene a producir la acidificación de la digestión y produce olor [2].

1.2.2 Lodos primarios

El lodo primario es producido durante el tratamiento primario del agua residual, este proceso se da luego del desarenador y se transporta al tanque de sedimentación donde el lodo se ubica en el fondo. Está compuesto en su mayoría de elementos no disueltos, como materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc. [2].

1.2.3 Lodos secundarios

También conocido como lodos activos, los cuales se determinan al finalizar el tratamiento biológico realizado en el agua residual, donde la interacción de diferentes microorganismos y bacterias al requerir oxígeno para vivir se consumen la materia orgánica dando origen a flóculos que contienen biomasa viva o muerta con nutrientes almacenados [2].

1.2.3 Lodos terciarios

lodo terciario se produce a través de procesos de tratamiento posteriores, ex. adición de agentes floculantes.

1.3 Tratamiento de lodos residuales

tratamiento de aguas tiene como fin remover contaminantes para disponerla en otros usos. Sin embargo, como consecuencia del tratamiento se presentan lodos como subproductos contaminantes debido al alto índice de materia orgánica; el tratamiento propuesto para el lodo está dirigido a lograr la estabilización del mismo con respecto al volumen, olor e inactivación de microorganismos patógenos [3].

1.3.1 Espesamiento

El tratamiento de fangos activos mediante el proceso de espesamiento de los mismos, tiene como objetivo principal reducir el volumen de estos aproximadamente entre 30 y 80 % antes de realizar cualquier otro tratamiento [4].

1.3.1.a Espesamiento por gravedad: Cuenta con un espesador de gravedad el cual opera de forma muy similar a un decantador ya que la alimentación de sólidos se realiza hacia la zona central del espesador y desde ella son distribuidos en todo el espesador, recogándose los fangos espesados en el fondo del mismo; hacia la parte superior del tanque queda el sobrenadante que es retirado por medio de vertederos, este tipo de tratamiento refiere 3 etapas las cuales se estructuran como zona de alimentación, zona clarificada y zona de compactación respectivamente[4].

1.3.1.b Espesamiento por flotación: Este método es empleado para concentrar lodos activos procedentes del tratamiento biológico del agua residual. los lodos se concentran como flóculos gracias a la baja capacidad de sedimentación; las partículas deben tener menor densidad que la del agua a tratar, si esto se cumple la flotación se produce de manera autónoma, de lo contrario se debe aplicar inyección de burbujeo [4].

1.3.1.c Espesamiento por medio de centrifugación: Este método se usa principalmente en proceso de deshidratación de lodos. se basa en separar partículas sólidas presentes en el lodo donde se ejerce la fuerza centrífuga sobre el elemento generando una suspensión que se concentra más rápido que por gravedad [4].

1.3.2 Estabilización de lodos

Este proceso se lleva a cabo con 2 fines, inicialmente para reducir la presencia de patógenos, reducir olores desagradables y reducir el porcentaje de putrefacción. Los métodos más eficaces para eliminar lo anterior son: reducción biológica de materia volátil, la adición de agentes químicos y adición de calor con el fin de desinfectar el lodo [5]. Las técnicas de estabilización son:

1.3.2.a Digestión anaerobia: Se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado por tiempo prolongados, donde la materia orgánica contenida se convierte en metano y dióxido de carbono. Una vez retirado el lodo contiene un bajo índice de materia orgánica y patógenos vivos [5].

1.3.2.b Digestión aerobia: En este proceso conforme a como se agota el sustrato los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma (respiración endógena) para obtener la energía necesaria para realizar las reacciones correspondientes. donde el tejido celular se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua. esta operación requiere de bajos costos de operación iniciales [5].

1.3.3 Deshidratación

La deshidratación de lodos se produce de manera natural, para esto se aplican factores de tamaño y firmeza. Por lo general se aplican floculantes para alcanzar mayores concentraciones de materia seca [4].

1.3.3.a Lechos de secado: Proceso natural donde el lodo, se coloca en compartimientos rectangulares de poca profundidad, con un fondo poroso, el cual permite la incidencia de luz solar y viento lo cual deshidrata en un tiempo prolongado el lodo. es el método más económico, simple y con límite de consumo de energía.

1.3.4 Desinfección

Es la última etapa de tratamiento empleada para eliminar los organismos patógenos, ha adquirido una gran importancia debido a las restrictivas normas que existen para garantizar la protección de la salud [3].

1.3.4.a Pasteurización: Este método es usado principalmente en países europeos donde es un proceso obligatorio para la desinfección de los lodos que se usan sobre los pastos durante las estaciones de primavera y verano, la pasteurización se realiza mediante inyección directa de vapor e intercambio indirecto de calor [4].

1.3.4.b Almacenamiento a largo plazo: Se emplea para retener el material durante periodos en los que no se puede usar en el terreno debido a condiciones climáticas o con respecto a características de los cultivos. el lodo depositado, aumenta su concentración y se le aplica un proceso de estabilización adicional debido a la continua actividad de los organismos anaerobios.

1.3 Clasificación de lodos residuales

Inicialmente los lodos se clasifican en tres categorías: aprovechables, no aprovechables y peligrosos.

1.4.1 Aprovechables

Son los lodos provenientes de un proceso de tratamiento que puede ser reutilizado directa o indirectamente en reciclaje, compostaje y generación de energía. La mayoría de los lodos provenientes de los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios de las plantas de tratamiento de

aguas residuales, una vez estabilizados, pueden ser utilizados como abonos, acondicionadores y restauradores de suelos [6].

1.4.2 No aprovechables

Son lodos que no tienen características aceptables para algún aprovechamiento, por ejemplo, tienen muy poca o nula carga orgánica o poder calorífico muy bajo, estos pueden ser desechados junto con los residuos sólidos de origen doméstico 22 en rellenos municipales o mono rellenos. En esta categoría se encuentran los retenidos por rejillas gruesas y finas de las plantas de tratamiento [6].

1.4.3 Peligrosos

Son aquellos que contienen sustancias que pueden causar daño a la salud humana o al medio ambiente que deben ser dispuestos en sitios especiales con las medidas adecuadas de seguridad. Comúnmente se suele confundir el término lodo y biosólido. La principal diferencia radica en que el biosólido es un lodo ya estabilizado, es decir, que ha tenido un proceso de tratamiento destinado a reducir la capacidad de fermentación, atracción de vectores y patogenicidad, logrando reducir el nivel de peligrosidad y el grado de restricción para su reutilización [6].

No obstante, se debe tener en cuenta el decreto 1287 del 2014 por el cual se establecen los criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas municipales [7].

1.5 Aprovechamiento del lodo residual

Dependiendo de las características otorgadas a los lodos residuales, se han desarrollado diferentes investigaciones en distintas áreas de aprovechamiento como

1.5.1 Aprovechamiento como fertilizante orgánico

Para la obtención de este producto se debe tener en cuenta diferentes condiciones para lograr un producto favorable. Luego de realizar la estabilización de lodos residuales, se logra definir una serie de características finales, las cuales permiten brindar como restauradores de suelos o abono en diferentes locaciones.

1.5.2 Aprovechamiento energético

Actualmente la energía proporcionada por fuentes fósiles incrementa las emisiones de gases efecto invernadero el cual contribuye al calentamiento global. Por esta razón se brinda la posibilidad de generar energía a partir de lodos residuales los cuales cuentan con un alto contenido de biomasa, estos conservan energía la cual por medio de digestión de microorganismos aerobios o anaerobios generan productos capaces de proveer energía potencial para la población.

1.5.3 Obtención de carbón activado

Aquellos lodos que cuenten con un alto índice de carbono pueden hacer parte de este aprovechamiento ya que son potenciales para la purificación de aguas y aire.

1.5.4 Aprovechamiento como material de construcción

La adición de lodos en la producción de materiales cerámicos es interesante teniendo en cuenta la gran capacidad de inertización de metales pesados. Además, cuenta con un ahorro energético positivo. Según estudios previos se especifica que la elaboración de material en función del porcentaje de lodo adicionado en reemplazo de la arcilla.

1.5.5 Restauración de espacios

Este aprovechamiento se basa en restauración de terrenos forestales, los cuales han estado en condiciones de explotación, donde se realiza una aplicación de lodo residual el cual inicia una descomposición rápida, generando diferentes tipos de colonias en microorganismos los cuales según investigaciones anteriores confirman una recuperación en un tiempo aproximado de un año.

1.6 Compostaje

Proceso aerobio de degradación de materia orgánica, con aumento de temperatura de forma controlada; se realiza por acción de microorganismos en presencia de aire para generar abono orgánico llamado compost. Este producto ayuda a mejorar las propiedades del suelo

proporcionando estabilidad y capacidad de sostener plantas incrementando la capacidad de intercambio catiónico, el cual facilita la retención de nutrientes, reduciendo la producción de lixiviados; adicionalmente debido a la cantidad de materia orgánica mejora la estructura del suelo dando un valor agregado aportando microorganismos, macro y micronutrientes.

1.6.1 Condiciones requeridas

Considerando que el proceso de compostaje se da a partir de microorganismos, se deben tener en cuenta parámetros que afectan su crecimiento y reproducción, como:

1.6.1.a Humedad: Es un parámetro directamente asociado con la mayoría de seres vivos los cuales utilizan el agua como transporte de nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular [8].

1.6.1.b Temperatura: El compostaje se da desde la temperatura ambiente hasta los 65°C debido a la actividad microbiana, la cual puede llegar hasta los 65°C sin ningún suministro de calor adicional. El control de temperatura es importante debido a que es deseable que la temperatura no descienda tan rápido teniendo en cuenta que, al tener cierto incremento, el nivel de descomposición también aumenta [8].

1.6.1.c pH: Esta variable en el proceso normalmente cambia dependiendo de los materiales de entrada y durante cada fase. El pH permite verificar la supervivencia de microorganismos ya que cada grupo tiene un índice óptimo de crecimiento y multiplicación. El rango ideal es de 5.8 a 7.2 [8].

1.6.1.d Relación C/N: Esta variable está en función de los materiales escogidos a compostar, donde se determina la cantidad de carbono total y nitrógeno total. El cual tiene un rango de operación de 35:1 y 15:1 [8].

1.6.1.e Tamaño de partícula: La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato. Si las partículas son pequeñas, hay una

mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm [8].

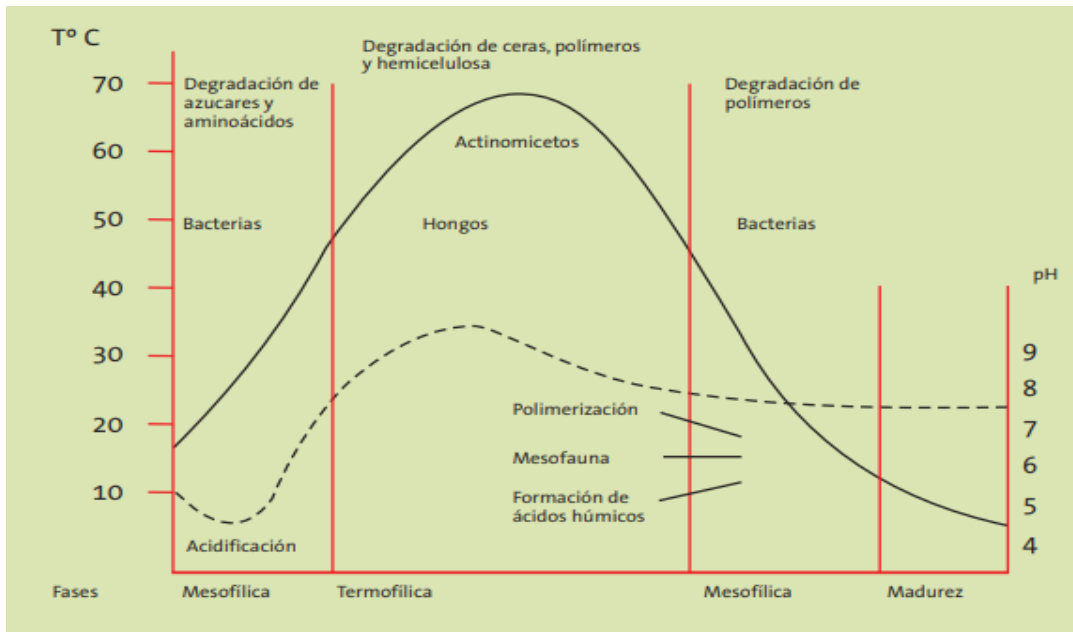
1.6.1.f Aireación: Al tratarse de un proceso aerobio, se debe tener una entrada de oxígeno adecuada, la cual permitirá la respiración adecuada de los microorganismos, liberando a su vez dióxido de carbono a la atmósfera. El sistema de aireación suministrado evita que el proceso se ahogue o encharque [8].

1.6.2 Fases de compostaje

El proceso de compostaje puede dividirse en tres etapas.

Figura 1.

Esquemas variables que intervienen en el proceso de compostaje



Nota. Se muestra la relación de pH y temperatura a lo largo de las diferentes etapas de compostaje. Tomado de: J.M Álvarez, Manual de compostaje para agricultura ecológica, 7p, researchgate https://www.researchgate.net/publication/311789650_Manual_de_compostaje_para_Agricultura_Ecológica

1.6.2.a Fase mesófila

Es el periodo de aclimatación de los microorganismos a su nuevo medio y el inicio de a multiplicación y colonización de los residuos. En esta etapa dura aproximadamente de 2 a 4 días dependiendo de los componentes. Las bacterias de los elementos más biodegradables trabajan a temperatura baja +/- 50°C [9].

1.6.2.b Fase Termófila

Como consecuencia de actividad de las bacterias y el aumento de temperatura alcanzada en los residuos, provoca la aparición de organismos termófilos (bacterias y hongos). Estos organismos actúan a temperaturas mayores (entre 60°C y 70°C), produciendo una rápida degradación de la materia, la temperatura alcanzada en esta etapa garantiza la higienización y eliminación de gérmenes patógenos, larvas y semillas [9].

1.6.2.c Fase de maduración

Es un periodo de fermentación lenta, la cual podría llegar a durar hasta 3 meses, en el que la parte menos biodegradable de la materia orgánica se va degradando, la temperatura disminuye drásticamente conjunto el proceso [9]. En la Figura 1 se observan mejor las diferentes fases del compostaje y la relación entre temperatura, pH y oxígeno en el proceso del mismo.

1.7 Tipos de compostaje

1.7.1 compostaje aerobio

Es un proceso exotérmico de degradación y estabilización biológica de un material orgánico en presencia de oxígeno mediante la acción combinada de una serie de poblaciones de microorganismos asociados a una sucesión de factores ambientales, obteniendo como principales productos del metabolismo biológico: dióxido de carbono, agua y calor [10].

1.7.2 compostaje anaerobio

Este proceso se basa en la descomposición de la fracción orgánica en ausencia de oxígeno obteniendo como productos finales metano, dióxido de carbono y numerosos productos orgánicos de bajo peso molecular como ácidos y alcoholes. La materia orgánica, actúa como nutriente de microorganismos anaerobios, que la descomponen y dan como producto final biogás, compuesto por metano y anhídrido carbónico [10].

1.8 técnicas de compostaje

Existen diversos tipos de compostaje, los cuales no varían de su objetivo principal que es el de transformar los residuos sólidos orgánicos para la producción de compost [10].

1.8.1 Sistema abierto

1.8.1.a Compostaje en hilera: Este sistema se puede construir a partir de residuos orgánicos en hileras con una sección transversal triangular o trapezoidal con láminas duras superficiales. La altura de la hilera va de 1 a 2 m y de base de 3 a 4 m de ancho [10].

1.8.1.b Compostaje de pila estática aireada: Este sistema se basa en una línea de tuberías aireadas sobre las cuales se coloca una fracción orgánica procesada, estos residuos se agrupan en pilas de 1 a 2 metros de alto, 3 a 4 metros de ancho y 20 m de longitud [10].

1.8.1.c Compostaje de pilas estáticas aireadas de forma pasiva: Se coloca el material a compostar en pilas y se airea en forma pasiva, a través de una red de tuberías perforadas que se colocan en la parte inferior de la pila. Se coloca una cubierta porosa con el fin de permitir el flujo adecuado de aire que entra a través de las cañerías. Se coloca el material a compostar en pilas y se airea en forma pasiva, a través de una red de tuberías perforadas que se colocan en la parte inferior de la pila. Se coloca una cubierta porosa con el fin de permitir el flujo adecuado de aire que entra a través de las cañerías [10].

1.8.1.d Compostaje en pilas aireadas forzadamente: En este sistema se utiliza un compresor que despliega aire al exterior o es inyectado al interior, el compresor también controlara el enfriamiento al interior de la pila [10].

1.8.2 Sistema cerrado

Son sistemas que poseen una mayor inversión y tecnología más moderna para que el material a compostar no esté en contacto con el exterior, estos sistemas ofrecen control total sobre las variables del proceso de compostaje, sobre todo en la emisión de malos olores produciendo una descomposición más rápida de materia orgánica, que las condiciones meteorológicas y ambientales no puedan afectar [11].

Los sistemas cerrados pueden ser continuos como: reactores horizontales/verticales, túneles, tambores rotatorios donde el sustrato a compostar ingresa correctamente. Adicionalmente existen los discontinuos como túneles estáticos o hileras, ya que el flujo de entrada ingresa una vez el reactor este vacío. La aireación siempre es forzada y el aire absorbido siempre puede ser recirculado en función de la concentración de oxígeno [11].

1.8.2.a Reactores verticales: Se basa en un recipiente cilíndrico, fabricados normalmente de hormigos y acero inoxidable, generalmente aislados térmicamente. Incluye un sistema de aireación forzada la cual se da a través del fondo por medio de tubos de aireación o por la parte superior con lazas de aire [12]

1.8.2.b Reactores horizontales: Este diseño es similar al compostaje en pilas, ya que son hileras y canales donde a través de paredes se da el material a tratar, por lo general en el sistema se brinda condiciones aeróbicas por medio de volteo. En la mayoría de diseños para evitar altas emisiones, todo se mantiene a presión negativa. Por lo tanto, este proceso se realiza en forma de lotes o continua; aquellos que funcionan de manera continua se subdividen en movimiento longitudinal o lateral [12].

1.8.2.c Bioceldas: Son unidades cerradas herméticamente, de forma rectangular en las cuales se les adiciona el material a compostar. Teniendo en cuenta que los contenedores se encuentran completamente cerrados el proceso de compostaje tiende a optimizarse en tiempo. Las bioceldas son procesos por lotes los cuales están diseñados para que la pérdida de calor sea mínima, de ese

modo el periodo de compostaje sea intensivo dándose en un tiempo aproximado de 14 días. La duración real depende del tipo de material introducido. Adicionalmente el sistema de aireación se da de forma forzada la cual cuenta con biofiltros los cuales permiten recircular el gas obtenido de la mezcla [12].

1.8.2.d Contenedores: Son sistemas de forma rectangular con capacidades volumétricas de 20 a 40 metros cúbicos, El sistema de aireación se da por el fondo a través de boquillas, el cual se puede recuperar por medio de un biofiltro el cual permite recircular normalmente. Este sistema está equipado por un sistema de agua el cual elimina la humedad por gravedad a través de perforaciones situadas en el fondo [12].

1.8.2.e Túneles: Los biotúneles son cajas rectangulares construidas de hormigón y ladrillo. El sistema de aireación se da por medio de compresores y forzando el aire a través del suelo; adicionalmente se adiciona una tubería superior la cual elimina el aire entregado a través de una presión negativa. El tiempo de detención del material por lo general se da cerca de 14 días el cual se optimiza ya que se realiza una recirculación de cerca del 80% de aire de proceso [12].

1.8.2.f Reactor de tambor giratorio: Consiste en un cilindro giratorio, su fabricación parte de realizarse por medio de una ligera inclinación, la cual permite que el sustrato a compostar fluya hacia abajo desde la parte superior hacia el fondo de la unidad. Algunos reactores cuentan con aletas internas que, combinadas con la acción giratoria, fuerzan el material a la reducción de tamaño y a la mezcla de la materia prima. Por lo general las concentraciones de humedad y oxígeno en el reactor se controlan y se mantienen óptimos; normalmente el funcionamiento del reactor se da con una capacidad de 2/3 del mismo el cual permite un tiempo de detención de aproximadamente 1 semana [12].

Figura 2.

Reactor de tambor giratorio



Nota. Se muestra un típico reactor de tambor giratorio. Tomado de: J. Culpepper, "Rotating drum composter design guide." 16p, Enero 8, 2020. Disponible: <http://docplayer.net/185467393-Rotating-drum-composter-design-guide.html>

2. DIAGNOSTICO

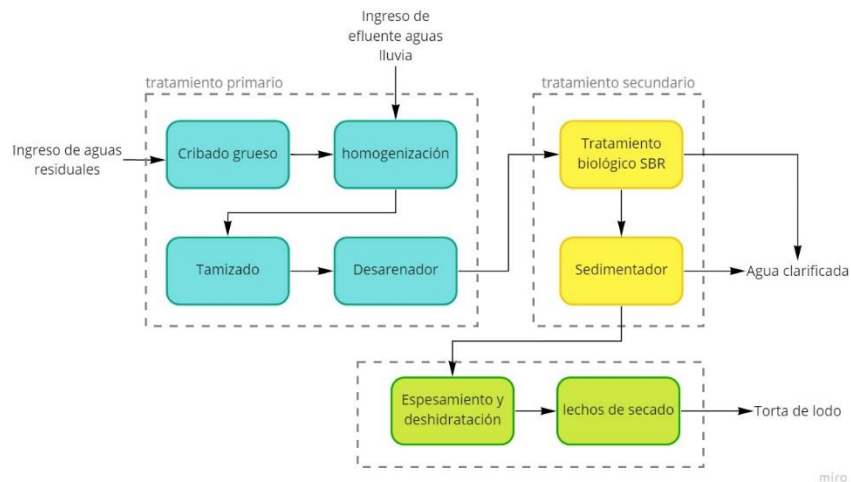
En este capítulo se presentará el diagnóstico del lodo generado por la PTAR del municipio de Funza, Cundinamarca. Con el fin de conocer sus características físicas y químicas aprovechables para la producción de abono orgánico, así mismo las cantidades necesarias y producidas por medio del proceso de compostaje.

2.1 Descripción del proceso previo al compostaje

El municipio de Funza, Cundinamarca cuenta con la planta de tratamiento de aguas PTAR la cual es administrada por la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo (EMAAF ESP). Está ópera con agua domestica e industrial, a través de un caudal de ingreso de 90 litros por segundo; el objetivo principal es disminuir la carga de aguas contaminadas hacia el humedal el Gualí el cual conecta con el rio Bogotá, haciendo cumplir la normativa nacional vigente (Decreto 3930 de 2010 de vertimientos al recurso hídrico). El modelo de operación actual se fundamenta en un tratamiento de aguas convencional el cual consta de una fase primaria y secundaria donde se garantiza la calidad del efluente.

Figura 3.

Diagrama de proceso de tratamiento de aguas residuales



Nota: Se evidencia el proceso global de tratamiento de aguas con sus respectivas fases de tratamiento primario y secundario.

2.1.1 Proceso en la planta de tratamiento de aguas residuales:

2.1.1.a Tratamiento primario: Inicia con la corriente de aguas provenientes de las zonas residenciales e industriales ubicadas dentro del municipio, las cuales son direccionadas a un sistema de cribado grueso correspondiente a la remoción de sólidos gruesos. Luego la corriente ingresa a un tanque de homogenización y bombeo con capacidad de 140 litros por segundo, donde se combina el efluente de aguas lluvias; este sistema cuenta con 4 bombas sumergibles de ingreso al sistema de tratamiento las cuales funcionan cada una con un caudal de 103 litros por segundo. Adicionalmente cuenta con un sistema de bombeo modo tormenta. Posteriormente se lleva a cabo el proceso de tamizado el cual está conformado por 6 unidades, cada una con capacidad de 66 litros por segundo, con apertura de malla de 3mm lo cual garantiza retención de sólidos medios. Por último, se dirige a la remoción de arena en un desarenador por gravedad el cual tiene como función conseguir una distribución uniforme del fluido dentro de la unidad, permitiendo que las partículas sólidas caigan al fondo por acción de la gravedad, debido a la velocidad producida por el aumento de sección.

2.1.1.b Tratamiento secundario: Esta etapa se da con el ingreso al sistema biológico el cual permite los procesos de oxidación biológica, nitrificación, desnitrificación, remoción de fosforo y estabilización aeróbica, consta de 2 reactores secuenciales en 3 etapas. Inicialmente con el objetivo de remover material disuelto del agua se implementa la aireación, donde se inyecta aire a presión en el fondo del zanjón mediante difusores de burbuja fina, usando tres tubos sopladores. Luego se realiza el proceso de sedimentación en el cual se precipitan los sólidos sedimentables y por último se determina el proceso de decantación donde se descarga el agua clarificada a través del decanter. Adicionalmente existe un sistema de lodos activados los cuales se alojan en un zanjón de oxidación el cual cuenta con 8 aireadores superficiales tipo tritón, después es decantado al sedimentador barre-lodos tipo radial.

2.1.1.c Lechos de secado: Empieza en un tanque en el cual se realiza el espesamiento y la deshidratación del lodo por medio polímero catiónico ya que por su alto peso molecular ofrece estándares más altos de calidad en el espesamiento del lodo. Por último, la PTAR cuenta con 24 celdas dispuestas para secado, las cuales tienen 75 metros cúbicos aproximadamente los cuales se

complementan con arena y pueden durar cerca de 4 a 6 meses. Este proceso se basa en la evaporación de agua presente en la superficie de los lodos hasta lograr el grado de secado deseado. A continuación, en la Imagen 2 se observa el proceso progresivo que ocurre en los lechos de secado.

Figura 4.

Lecho de secado de la PTAR municipio de Funza.



Nota: se evidencia celda (a) la cual se encuentra recientemente llena de lodo residual y la celda (b) la cual ya cuenta con 6 meses de exposición.

2.2 Caracterización del lodo residual

En la determinación de las características originales del lodo residual fue necesario realizar el siguiente proceso.

2.2.1 Muestreo

El proceso de muestreo de acuerdo a lo establecido por la NTC 5667-13[13], la cual tiene como objetivo instruir sobre el procedimiento para muestreo en tortas de lodos provenientes de aguas residuales. Inicialmente se debe tomar una porción de todas las capas de la torta que se encuentran en el lecho de secado, teniendo en cuenta no tomar la porción de arena arcillosa que se encuentra en el fondo, adicionalmente se debe evitar tomar muestras que contengan gran porcentaje de costras superficiales las cuales aumentan la actividad anaerobia.

Luego de tomar las diferentes porciones de lodo, se realiza la reducción de tamaño de la muestra por medio de cuarteo, el cual consiste en formar diferentes montos ligeramente uniformes de lodo

en forma de cono, los cuales se deben mezclar mínimo 3 veces homogéneamente. Siguiendo al proceso anterior se procede a realizar subdivisiones las cuales permitirán obtener una muestra cualitativamente requerida.

Figura 5.

Distribución uniforme de lodo residual



Nota: La imagen representa las subdivisiones requeridas para obtener una mezcla homogénea.

Luego de obtener la cantidad de la muestra requerida, se procede a empacar la muestra en bolsas Ziploc, las cuales están fabricadas a partir de polietileno y son resellables lo cual permite un transporte óptimo, debido a la posible generación de gases. En caso de carecer de almacenamiento o recorrer un gran trayecto, esta debe encontrarse en un rango de temperatura de $< 4^{\circ}\text{C}$, de igual forma debe evitarse la exposición al sol. En la figura 6 se puede evidenciar la muestra de lodo recolectada, la cual fue rotulada y sellada para ser enviada al centro de biosistemas de la universidad Jorge Tadeo lozano.

Figura 6.

Muestra rotulada de lodo residual



Nota: Muestra rotulada para análisis.

2.2.2 Caracterización físico-química del lodo

A continuación, en la Figura 3 se describen los procedimientos empleados por parte del centro de biosistemas para determinar las principales características del lodo residual. Para tener en cuenta la metodología usada en el análisis por parte del centro de biosistemas para cada una de las variables requeridas fue anexada junto a los resultados (Anexo 1).

Figura 7.

Metodología para determinación de parámetros físico-químicos

PARAMETRO	METODO
Humedad	Gravímetro a 70°C
Carbono orgánico	Calcinación
Cenizas	Gravímetro a 650°C
Nitrógeno Total	Nitrógeno Kjeldahl
pH	Extracto de saturación

Nota: Se muestra los métodos utilizados para determinar los parámetros necesarios dentro de la caracterización del lodo.

Luego de obtener los resultados del análisis del lodo residual, los cuales se pueden observar en la Tabla 1, la cual evidencia un valor de relación de C/N de 5.48 debido al alto contenido de nitrógeno presente (1.89% en base húmeda) en el lodo. Este valor es similar y cercano al que reportan [14], [15], por ende el valor indica una baja relación C/N por lo tanto se debe adicionar un agente de carga permitiendo un incremento en la relación C/N. el autor [8] establece que el valor indicado de la relación C/N debe estar en un rango de 15 a 35 unidades de carbono por cada unidad de nitrógeno disponible para poder ser efectivo el proceso de compostaje.

Por otro lado, con respecto a la humedad, se observa que el lodo analizado contiene un porcentaje de humedad del 63.12%, esto significa que tiene un alto contenido de humedad, el valor expuesto es similar y muy próximo al proporcionado en [16], Adicionalmente en [8] destacan la humedad como un parámetro importante dentro del compostaje, allí se establece que el porcentaje de humedad inicial del proceso debe estar entre 45% a 60%. De este modo se requiere de igual forma un agente adicional el cual contiene un bajo contenido de humedad al inicio del compostaje. Por parte del pH se observa que el lodo tiende a ser ácido-neutro al tener un valor de 6.8 cercano y similar a los lodos tratados en [17]. El autor [8], referencia un rango de actividad microbiana dada entre 4.5 y 8.5 siendo el pH óptimo para el crecimiento y la multiplicación de microorganismos empleados en el proceso de compostaje aerobio.

Tabla 1.

Principales características físico-químicas del lodo

VARIABLE	UNIDAD	VALOR
Humedad	%	62,13
Carbono orgánico	%	10,37
Cenizas	%	40,56
pH	-logH+	6,8
Nitrógeno total	%	1,89
Relación C/N	p:p	5,48
Densidad aparente	g*cm ³	1

Nota: Se muestra la tabla de resultados relevantes de características físico-químicas del lodo residual.

2.3 Agentes de carga

En la caracterización fisicoquímica de los lodos se evidencio la necesidad de implementar agentes de carga que permitan optimizar las condiciones del proceso de compostaje y del mismo modo obtener un buen producto de calidad.

Teniendo en cuenta el objetivo doce de desarrollo sostenible donde se promueve el crecimiento económico sin degradación ambiental y en el mismo orden obedece al desarrollo sostenible, se opta por emplear como agentes de carga los residuos obtenidos a través del municipio. Como la poda de césped resultante del mantenimiento de zonas verdes de diferentes conjuntos residenciales y de algunas instalaciones de la administración municipal. Siendo los recortes de césped una fuente ideal de carbono, reduce el porcentaje de humedad del lodo para encontrarse dentro de los estándares óptimos y es un buen activador de compostaje. En la tabla 2 se puede observar un resumen de las propiedades del lodo y del agente de carga a emplear. Los valores del agente de carga a utilizar fueron recopilados a partir de la literatura mencionada en [18].

Tabla 2.

Características del lodo y poda de césped como agente de carga en base húmeda

Material inicial	Carbono Orgánico total (%)	Nitrógeno Total (%)	Relación C/N	Humedad (%)
Lodo	10,37	1,89	5,48	62,13
poda de césped	29,06	1,15	25,27	38,85

Nota: En el cuadro se muestra los parámetros fisicoquímicos del lodo residual junto con los datos del agente de carga. Tomado de: M. Abdul, T. Sadi, A. Ahmad. “Inventory and compostig of yard waste in serdang, selangor, malaysia”, heliyon, 2020.

Acorde a los análisis físico-químicos obtenidos se evidencia que los residuos de poda de césped presentan una relación carbono nitrógeno alta (25.27) con respecto a la del lodo residual (5.48) debido al gran porcentaje de carbón orgánico presente en él. Además, el césped presenta menor

porcentaje de humedad (38.85%) lo cual indica una reducción de humedad de la mezcla a la entrada del reactor.

En la determinación de cantidades de césped generadas al mes, fue pertinente remitirse a los registros de la gestión de residuos llevada a cabo por parte de la EMAAF ESP. Teniendo en cuenta que la empresa no realiza un control sobre este, se estima que la generación mensual de la poda de césped es de 1200 kg aproximadamente, esta proporción proviene del mantenimiento de las áreas verdes correspondientes a las sedes administrativas, conjuntos residenciales y espacios públicos. A continuación, en la tabla 3 se presentan las cantidades de materia prima producidas al mes.

Tabla 3.

Cantidades máxicas y volumétricas de materia prima producidas

Materia prima	Densidad aparente	Masa (kg)	Volumen (m3)
Lodo	1000	1500000	1500
Césped	440	1200	2.73
Total		2700	1502.73

Nota: En la anterior tabla se encuentra a información de cantidades máxicas de los lodos y los recortes de césped como agente carga. La cantidad volumétricas se determinaron a partir de la densidad aparente. Donde la del lodo fue determinada por parte del centro de biosistemas Jorge Tadeo lozano y la del césped se tomó de: M. Abdul, T. Sadi, A. Ahmad. “Inventory and compostig of yard waste in serdang, selangor, malaysia”, heliyon, 2020.

3. SELECCIÓN DE PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS LODOS

En este capítulo se plantea la selección del proceso de compostaje a emplear por medio de una matriz de selección, donde se establecen las variables de ingreso del proceso. Además, se realiza un enfoque sobre la metodología empleada para el planteamiento y la elaboración del montaje experimental del proceso, al igual que los procesos por los cuales se realizó el seguimiento de las variables como temperatura, pH, humedad y cenizas.

3.1 Matriz de selección para el proceso de compostaje

Los procesos de compostaje ya mencionados en el Capítulo 1 de Generalidades, pueden ser llevados a cabo por medio de sistemas abiertos o cerrados. Los primeros se encuentran clasificados entre pilas de volteo y estáticas, mientras que los segundos son llamados reactores y se dividen en reactores horizontales y verticales los cuales suelen ser estáticos o de volteo. Para la selección del proceso de compostaje a emplear es necesario fijar los criterios a seguir dentro de la selección. Los cuales se propondrán de acuerdo a las necesidades expresadas por la planta de tratamiento de aguas del municipio de Funza, Cundinamarca.

Posteriormente se realiza un recuento de las ventajas y desventajas que pueden ofrecer cada uno de los procesos de compostaje, los cuales se van a evaluar por medio de la matriz de selección.

3.1.1 Pilas estáticas

Es el método de compostaje más básico que existe, el cual se basa en montones de productos orgánicos que se descomponen espontáneamente mediante procesos predominantemente anaerobios. El compostaje anaeróbico es un proceso que suele tardar entre 6 a 8 meses largos y normalmente al no generar suficiente temperatura, no se produce la eliminación de microorganismos patógenos. Una de las desventajas es la creación de olores y vectores de enfermedades, como las moscas. Adicionalmente, al ser un proceso de descomposición lenta significa que es menos consistente por ende entrega un producto de baja calidad [19]. En la actualidad el diseño de este proceso se puede realizar a través de aireación forzada el cual esencialmente trata de introducir aire a través de la pila por medio de tubos perforados de 10.2-

15.2 cm de diámetro, los cuales se colocan sobre la plataforma de compostaje. Los tubos ubicados en paralelo van conectados a un soplador a través de un tubo no perforado. La pila cuenta con un valor aproximado de 20-30 m de largo, 3-6 m de ancho y 1.5-2.5 m de alto. Este sistema cuenta como parámetro importante como lo es la humedad, ya que para que el compostaje no se vea afectado los residuos ingresados deben encontrarse entre 40-55% de humedad, esto permitirá que el proceso se pueda llevar a cabo de 4 a 5 semanas [12] .

3.1.2 Pilas por volteo

Dentro de la evaluación de control de proceso para una rápida descomposición de desechos orgánicos, se evaluó que las condiciones aeróbicas suelen ser mantener el material girando en descomposición, ajustando la humedad y triturando o desmenuzando el material desecho. El compostaje en hileras consiste en hileras lineales las cuales se voltean manualmente o mecánicamente para mejorar la aireación y la mezcla del compost, haciendo que las tasas de descomposición sean altas y homogéneas. En esencia, consiste en añadir de material fresco a un extremo de la hilera y retirar el material del otro a medida que se estabiliza [19] La construcción de este sistema se debe realizar a partir de tres criterios, donde inicialmente se evalué el alto de la hilera siendo valores ideales entre 1.5 y 3.0 metros, 3.0 a 4.0 m de ancho y 46.0 m de lardo lo cual permitirá un fácil volteo de extremo a extremo. Normalmente es un sistema que requiere bajos costos de inversión, es el proceso menos propenso a averías o perturbaciones técnicas, produce un compost de alta calidad [12]. Este proceso suele tener fuertes implicaciones con respecto al clima, teniendo en cuenta que en época de lluvias el compost suele volverse anaerobio debido a la baja actividad microbiana, requiere grandes zonas de amortiguación debido a los malos olores y vectores como la mosca [19].

3.1.3 Reactor horizontal

Este sistema consiste en unidades horizontales, las cuales pueden clasificarse como: canales, celdas, contenedores y túneles. Estos diseños son similares a las instalaciones de compostaje con hileras, donde el material a tratar se deposita entre paredes que varían entre 1-3 m de alto, longitudes de 50 m aproximadamente. Estos canales manejan una distancia de 6 metros de material a material. Este tipo de planta mantiene el compost a condiciones aeróbicas por medio de aire

forzado a través de volteo mecánico [12]. Todos los reactores se instalan por lo general en pisos subterráneos para así evitar emisiones de la masa, es un proceso que puede ejecutarse por lotes o continuamente teniendo en cuenta procesos que incluyan movimientos longitudinales o laterales, permitiendo que el material a compostar se mueva desde la carga inicial del reactor hasta la parte de descarga en dirección longitudinal. Para lo anterior se debe suministrar una banda transportadora la cual sirve como transporte de zona de descomposición a zona de maduración [12]. En la actualidad se desarrollan procesos que cuentan con un tiempo de recepción de residuos, empleando reactores horizontales de tambor giratorio, los cuales requieren una inversión robusta inicial ya que requiere de control sobre diferentes variables, al igual que su mantenimiento requiere de personal capacitado para su manipulación.

3.1.4 Reactor vertical

Este proceso se lleva a cabo a partir de recipiente cilindros, normalmente fabricados de acero y hormigón, aislados térmicamente, construidos desde 5 metros cúbicos hasta 1500 metros cúbicos [12]. Este proceso que requiere una inversión inicial alta, debido a los parámetros de control que se deben tener en cuenta, sin embargo es un proceso que permite un fácil control de aireación lo cual proporciona mayor degradación en un tiempo corto, tiene un tiempo de recepción de 7 a 20 días de residuos, los cuales son llevados desde el ingreso hasta el final por un tornillo transportador. Este proceso al ser aeróbico y al proporcionar gas se manejan por medio de biofiltros. Finalmente, una gran desventaja es que el mezclado tiene ciertas limitaciones debido a la acumulación en el fondo del reactor [20].

El primer criterio de selección es el tiempo de duración del proceso, teniendo en cuenta que los residuos generados, deben ser dispuestos y aprovechados en el menor tiempo posible, ya que la planta de tratamiento de aguas residuales produce una alta cantidad de lodo mensual. El segundo criterio de selección es la eficiencia del proceso, este tiene gran importancia, ya que permite dimensionar aproximadamente la cantidad de producto a obtener a partir de la cantidad inicial del residuo principal y el agente de carga de cada uno de los procesos a evaluar. El tercer criterio se basa en el área disponible para llevar a cabo el proceso, debido a que hay procesos que se

caracterizan por requerir grandes o pequeñas extensiones de terreno, por último, en todo proceso de selección es de vital importancia resaltar los costos para cada una de las opciones a evaluar. La metodología empleada para la matriz de selección se realizó mediante una adaptación de la matriz de decisión de *Stuart Pugh* la cual es una herramienta cuantitativa que permite la comparación de diferentes opciones entre sí a través de un arreglo multidimensional, donde se debe identificar los criterios o parámetros a ser evaluados junto con una determinada importancia (filas) y se especifican los procesos en los cuales se puede cumplir o no cada parámetro estipulado (columna), El método original se utiliza los valores de +1, -1 y 0. Sin embargo, dentro de la adaptación para la matriz de selección se realizó un ajuste, el cual modifica la valoración de parámetros por medio de factores ponderados, dando un peso específico sobre los criterios a evaluar, dichos factores son establecidos con respecto a las necesidades expresadas por la planta. Con respecto a los valores de la evaluación para la matriz de selección son de 1 (bajo), 3 (medio) y 5 (alto). El proceso de compostaje que adquiera el mayor puntaje será el que se empleara dentro de la propuesta.

Tabla 4.

Matriz de selección para el proceso de compostaje

CRITERIO		PROCESO DE COMPOSTAJE			
Descripción	Calificación	Pila estática	Pila con Volteo	Reactor horizontal volteo	Reactor vertical volteo
Tiempo	25%	1	1	5	3
Eficiencia	25%	1	3	5	5
Área disponible	20%	1	3	5	5
Costos	30%	5	3	1	1
Total	100%	2,2	2,5	3,8	3,3

Nota: En la anterior tabla se presentan calificación de los métodos de compostaje.

De acuerdo con lo evaluado en la matriz de selección (Tabla 4), la opción que se ajusta mejor a las necesidades y criterios expuestos por la planta de tratamiento de aguas residuales es el reactor

horizontal con volteo, el cual obtuvo un puntaje de 3.8. una vez se establece la modalidad de compostaje seleccionada, se procede a realizar las especificaciones de operación del mismo.

3.2 Desarrollo experimental

3.2.1 Construcción de reactores

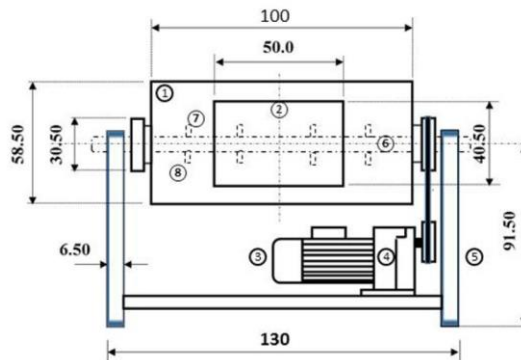
Los reactores horizontales son construidos para que funcionen en modalidad batch o lotes, debido a que un proceso de compostaje continuo a escala laboratorio requiere de accesorios sofisticados para alcanzar las condiciones ideales del proceso, los cuales aumentarían los costos del proyecto. Para la planeación y construcción de los reactores se realizó una revisión bibliográfica de fuentes que se basaran en la producción de compostaje aerobio de lodos residuales obtenidos a partir de plantas de tratamiento y que involucren otros materiales orgánicos.

Durante el proceso de investigación para la planeación del proceso con respecto al reactor a construir se encuentra el artículo [15]. El cual lleva a cabo el compostaje aeróbico en un reactor de tambor rotatorio a escala piloto. Este reactor se caracteriza por ser de hierro y por tener un recubrimiento interno de pintura anticorrosiva; al igual los soportes laterales de ruedas, los cuales permiten la rotación de los reactores. El reactor expuesto propone aletas internas en forma de cuchara, con el fin de permitir que el material ingresado pueda ser homogenizado. Adicionalmente enfatiza en la distribución de O_2 presente en el aire que ingresa por la compuerta lateral y por pequeños agujeros ubicados en la parte superior del reactor.

El artículo [21] expone y aplica el uso de un reactor horizontal empleado para el compostaje de residuos. Este diseño de reactor se ajusta a variables próximas al anterior descrito ya que tiene un principio de operación parecido, ya que se encuentra automatizado, a diferencia que el anterior se especifica que no cuenta con aletas internas, por el contrario, contiene un tubo fijo interno el cual permite la rotación automatizada. Por último, se debe tener en cuenta que en ambos estudios el tiempo de retención se encuentra entre 15 a 20 días, con determinadas condiciones, al igual el mecanismo de rotación de los reactores se da por medio de manivela tanto manual como automatizada.

Figura 8.

Diseño de reactor horizontal de tambor rotatorio



① Bioreactors ② Opening doors ③ Electric motor ④ Gearbox ⑤ Steel frames ⑥ Fixed tubes ⑦ Aeration ports ⑧ Thermocouple holders

Nota: Se presenta esquema de reactor horizontal con rotación automática empleado en el compostaje de residuos orgánicos. Tomada de: F. Alkokaik, “ integrating aeration and rotation processes to accelerate composting of agricultural residues”, plos one, 14, 7, pp 1-14 DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220343>.

Una vez establecida la estructura principal del reactor horizontal que se va a emplear en el experimento se procede a la adquisición de los materiales para la construcción de los mismos, se debe aclarar que el experimento se va a realizar por triplicado con la finalidad de tener confiabilidad y respaldo de los datos obtenidos, por lo mencionado anteriormente se opta por la construcción de 3 reactores. En [22] se desarrollan modelos de simulaciones de proceso de compostaje dinámico donde se emplearon diferentes materiales para la construcción de reactores a escala laboratorio donde se determinó que para diseños pequeños se deben emplear materiales de bajas densidades y coeficientes de conducción más pequeños. Por ende, para el cuerpo del reactor se opta por la adquisición de canecas de polietileno cuyas capacidades son de 60 L cada una, fueron escogidas debido a su bajo costo, baja densidad con respecto a materiales metálicos, adicionalmente su inmunidad a la corrosión ocasionada por algunos lixiviados. Las dimensiones de cada una de las canecas son 34 cm de diámetro por 65 cm de largo (Imagen 6). Con respecto a los tornillos arandelas, bisagras y pasadores se adquieren de acero inoxidable con el fin de prevenir la corrosión sobre estos. En el fondo de del reactor se realiza una abertura de 5 mm, la cual permitirá la salida de lixiviados por medio de una manguera de 5 mm. Para las aletas internas empleadas para el mezclado del compostaje, se toma un tubo de 10 cm de diámetro y 45 cm de

largo el cual se divide en la mitad, estas fueron fijadas a las paredes del reactor una traspuesta en posición de la otra como se puede observar en la imagen 6b; la rotación de cada uno de los reactores se debe realizar en contra de las manecillas del reloj a través de las ruedas fijas a la base del reactor.

Figura 9.

Diseño de reactor escala piloto



Nota: Se evidencia la construcción del reactor, vista exterior (a), interior del reactor sin aislante (b).

Para el aislamiento de cada uno de los reactores se empleó espuma de poliuretano de 8mm la cual es recomendada por [22], ya que en los procesos de compostaje a nivel laboratorio, al ser de volumen pequeño hay una menor generación y preservación de calor.

Figura 10.

Reactor recubierto con material aislante



Nota: Se muestra aislante de espuma de poliuretano.

Tabla 5.

Especificaciones de reactor y soporte

PARAMETRO		VALOR	UNIDAD
Longitud del reactor	$L_{reactor}$	0,65	m
Diametro del reactor sin aislante	$D_{sin\ aislante}$	0,34	m
Diametro del reactor con aislante	$D_{con\ aislante}$	0,34	m
Volumen del reactor	$V_{reactor}$	0,06	m^3
Masa del reactor vacio	$m_{reactor\ vacio}$	4,58	kg
Masa del reactor lleno con mezcla	$m_{reactor\ lleno}$	24,86	Kg
Diametro de abertura para circulacion de aire en la tapa	$D_{abertura\ tapa}$	0,01	M
Longitud de soporte	$L_{soporte}$	85	M
Ancho de soporte	$W_{soporte}$	0,4	M
	$h_{soporte}$		
Altura de soporte		0,1	M
Distancia entre ruedas	L_{ruedas}	0,35	M

Nota: Especificación de parámetros de diseño del reactor para su construcción a escala piloto. Elaboración propia.

3.2.2 Parametrización de variables iniciales de proceso

Las variables más importantes dentro del sistema inicial de compostaje pueden ser clasificadas de dos maneras, variables independientes en las que hay que establecer un control, denominadas variables de seguimiento como pH, humedad, temperatura. Por otro lado, se encuentran las variables relativas a la naturaleza del sustrato y son aquellas variables dependientes que deben ser adecuadas al inicio del proceso, entre ellas se encuentra el tamaño de partícula, aireación y relación C/N. Se realizó una revisión bibliográfica de diferentes autores que estudian el efecto de las variables mencionadas. Dicha información se puede evidenciar en la tabla 6.

Tabla 6.

Resumen de condiciones de un proceso de compostaje

Referente	Tamaño de partícula (mm)	relación C/N	Humedad (%)
F. Alkhoaik (2019) [21]	-	12-25	57-60
K. Azim, B. Souidi, C. Perissol (2017) [23]	20-40	10-30	45-50
S. Hemidat, M. Jaar, A. Nassour, M. Nelles (2018) [24]	20	28-41	50-60
C. Guinea, A. Leahu (2020) [25]	-	14.7-36.4	74-90
M. Shirish, M. Daga (2018) [RW.ERROR - Unable to find reference:doc:616cb2d2c9e77c0001cc20b2]	10-20	15-23	40-65

Nota: En la tabla se presentan diferentes recopilaciones bibliográficas, tener en cuenta que las especificaciones dependen del tamaño de la pieza y las condiciones climáticas. Elaboración: propia.

Con respecto a la frecuencia de aireación de un reactor, el autor [21] realiza un análisis de comportamiento de la aireación con respecto a un reactor horizontal estático, de esta manera evalúa el efecto de la frecuencia de aireación de 3 rotaciones cada 6, 12, 18 y 24 horas, lo cual concluyó que al realizar 3 rotaciones cada 24 horas el tiempo de recepción es menor a 15 días. Argumentando que es la duración en la que alcanza mayores temperaturas las cuales confieren mejor degradación

y mejores características para la producción de abono orgánico. Mientras que en el resto de experimentos se registraron menores temperaturas, debido a la disipación de calor a razón de la frecuencia de aireación. Por lo tanto, para el experimento a realizar se determina una frecuencia de aireación de 2 rotaciones cada 12 horas durante (30 días).

Teniendo en cuenta los datos suministrados en la tabla 6, a partir del autor [23] el cual realiza una parametrización de componentes en el compostaje donde indica la adecuación de la materia prima antes del ingreso al reactor, por ende, se establece que el tamaño de partícula con el que se va a iniciar el proceso es de 20 a 40 mm, lo cual permite una mejor circulación de O_2 y una mayor velocidad de degradación por parte de los microorganismos ya que cuentan con una mayor área de contacto. Adicionalmente, se debe aclarar que tamaños de partícula inferiores a los presentados en la tabla 6 puede generar compactaciones, proporcionando una degradación lenta o prácticamente nula.

Con respecto a la relación C/N inicial del proceso se establece que debe encontrarse entre 15 y 25 por unidades de carbono, los procesos que se generan dentro de ese parámetro por lo general producen abonos orgánicos de calidad para implementarse en actividades agrícolas. Por último, con respecto a la humedad en [8] menciona que un alto porcentaje de humedad puede ser perjudicial ya que se puede desplazar el oxígeno generando zonas de anaerobiosis, al igual un bajo porcentaje de humedad puede detener el proceso por falta de agua para los microorganismos.

3.2.3 Método de medición de variables

Para el seguimiento de variables se deben utilizar diferentes métodos de medición, debido a las limitaciones instrumentales es necesario realizar una clasificación donde la medición de temperatura, humedad, pH y Cenizas se realiza con ayuda de instrumentos que se encuentran dentro del lugar de experimentación.

3.2.3.a Cenizas: Este parámetro se realiza por medio de calcinación establecido por la NTC 1886 (1963) [26], este proceso se realiza a partir de la diferencia de pesos antes y después del proceso de calcinación, llevado a una mufla a 650°C durante 4 horas, posteriormente las muestras son trasladadas a un desecador el cual se encarga de bajar la temperatura sin captar humedad exterior

y así registrar la diferencia de pesos registrados en una balanza analítica. Este parámetro indica el grado de degradación de la cantidad de materia orgánica que se ha descompuesto en el proceso de compostaje.

3.2.3.b. pH: Para la medición de este parámetro se emplea un multímetro (Multi 3630 IDS WTW) (Anexo 2) con precisión (± 0.004), utilizado con sus respectivas soluciones calibradoras certificadas. Para la medición se tomaron muestras de diferentes partes del reactor luego del volteo y la aireación para reducir grandes cambios. El procedimiento consiste en limpiar correctamente con abundante agua destilada el electrodo y posteriormente calibrar el equipo. La muestra obtenida en el reactor debe ser de 5 g para diluirla en 25 ml de agua destilada y así alcanzar una relación de 1:5 g/ml como lo sugiere [27], una vez homogenizado se procede a introducir el instrumento en cada una de las muestras, limpiando el equipo con abundante agua destilada entre cada intervalo con el fin de evitar dispersiones.

3.2.3.c Temperatura: Se emplea un medidor de temperatura digital Thermco (Anexo 2) de 12" con punzón sonda de acero inoxidable que cuenta con un rango de medición de -50°C a 300°C con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Para obtener una temperatura uniforme y evitar disipación de calor, la medición se realiza todos los días a la misma hora previamente al volteo y aireación de cada reactor la medición se realizó a 4 distancias de la superficie, 5cm, 10 cm, 15 cm y 20 debidamente marcadas en la sonda del termómetro. La medición se realiza posteriormente a tomar la temperatura ambiente.

3.2.3.d Humedad: La humedad fue determinada por un método gravimétrico de acuerdo con la NTC 1495 (2013) [28], la cual se basa en la diferencia de peso antes y después del calentamiento de una muestra contenida en un recipiente. Este proceso se llevó a cabo en una balanza analítica luego de haber pasado los crisoles por el desecador, se registraron los pesos en el momento que no había una variación significativa.

3.3 Acondicionamiento del lugar de trabajo

Para desarrollar el experimento, el lugar de trabajo seleccionado teniendo en cuenta la cercanía a los lechos de secado y el área disponible dentro de la planta con acceso al material de carga

necesario para el proceso. Como no se cuenta con lugar cerrado y con infraestructura adecuada para posicionar los reactores sin exposición directa al sol y a la lluvia, se procede a adecuar una porción de terreno de la planta en la cual se cumplan las condiciones establecidas al principio. Partiendo de las consideraciones anteriormente expuestas se opta por la instalación de una carpa la cual se ubica a pocos metros de los lechos de secado en un terreno cuyas dimensiones son de 5 m de largo y 6 m de ancho.

Figura 11.

Localización del montaje experimental en la planta



Nota: En la imagen se visualiza la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza, Cundinamarca.

Figura 12.

Lugar de montaje experimental



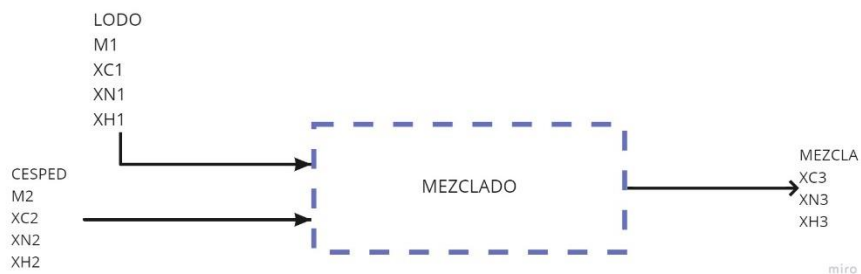
Nota: En la imagen se evidencia la posición de los 3 reactores antes de la de la instalación de la carpa.

3.4 Adecuación y balance de materiales de compostaje

En esta etapa se realiza la adecuación del lodo y el material de carga a utilizar en el compostaje, al igual que se homogeniza la mezcla al cargar al reactor, cumpliendo con los parámetros requeridos previamente de humedad, tamaño de partícula y balance de nutrientes C/N. Con el fin de alcanzar la relación C/N dentro de los límites de (15 a 25) se debe realizar un balance de masa de los nutrientes aportados por el agente de carga. Dentro de la rigurosidad del cálculo de las cantidades de carga necesarias para alcanzar la relación C/N deseada, [29] recomienda dentro del capítulo de compostaje Cornell un balance que relaciona la humedad aportada por el agente de carga; el desarrollo de la propuesta para llegar a las diferentes expresiones se encuentran en el Anexo 3.

Figura 13.

Esquema balance de materiales



Nota: En la figura se evidencia el origen de los balances y la masa de control es el mezclador con las variables correspondientes a cada corriente.

Para la solución de las ecuaciones de humedad de entrada y relación de C/N deseada, es necesario tener en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica mostrada en el capítulo 2 para cada uno de los agentes de carga, adicionalmente se debe especificar la capacidad máxima permisible de un reactor la cual es aproximadamente de 60 L. Con el objetivo de facilitar el volteo, la aireación y disminuir la disipación de calor se opta por cargar un 60% el cual corresponde a la capacidad de 36 L. Como se mencionó anteriormente para cargar el reactor se tuvo en cuenta la densidad de la poda de césped encontrada en [30] la cual es de 440 kg/m³ y la del lodo obtenida en la tabla 3 la cual es de 1000 kg/m³, posteriormente se determina la masa necesaria para llenar el reactor dividiendo por el volumen total del recipiente para cada componente.

Una vez establecido este valor se resuelven las diferentes ecuaciones planteadas para la experimentación generando los resultados representados en la tabla 7. Para cargar cada reactor fue indispensable triturar la poda de césped y el lodo para llegar al diámetro de partícula establecido.

Tabla 7.

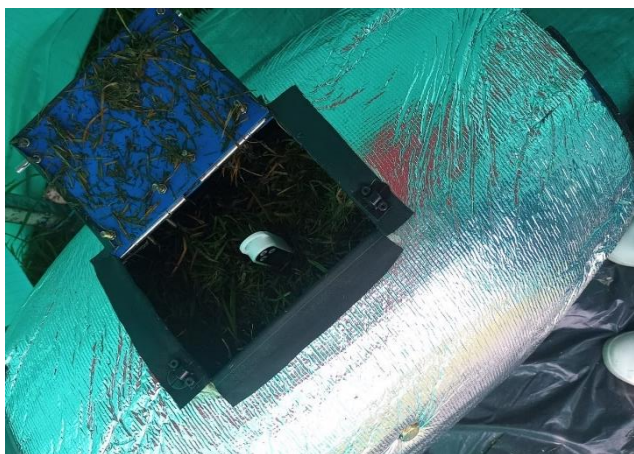
Cantidades de lodo y agente de carga empleados en la experimentación

Características alimento	Valores R1	Valores R2	Valores R3
Relación C/N	15,12	15,12	15,12
Humedad global	47,93	47,95	47,94
Cantidad de lodo	7,92	7,92	7,92
Cantidad de césped	12,36	12,36	12,35

Nota. En la tabla anterior se evidencian cantidades formuladas para la carga de cada reactor cumpliendo con los parámetros establecidos para el desarrollo del compostaje.

Figura14.

Estado inicial de los reactores



Nota: En la ilustración se muestra el estado de la semana uno de los reactores en la experimentación.

3.5 Desarrollo experimental del proceso de compostaje

3.5.1 Descripción inicial del proceso

Para la experimentación, inicialmente se tomaron decisiones con respecto a las variables iniciales de la mezcla como la temperatura, pH, frecuencia de aireación, Rotaciones por minuto y tiempo de aireación. Para así garantizar la degradación y mineralización de los materiales y finalmente lograr la madurez del producto.

Tabla 8.

Variables iniciales para la experimentación

Características alimento	Valores R1	Valores R2	Valores R3
Temperatura °C	17,50	17,50	17,50
pH	8,96	9,01	9,07
Frecuencia de aireación (h)	Cada 12	Cada 12	Cada 12
Velocidad de rotaciones por minuto	4	4	4
Tiempo de aireación (min)	5	5	5

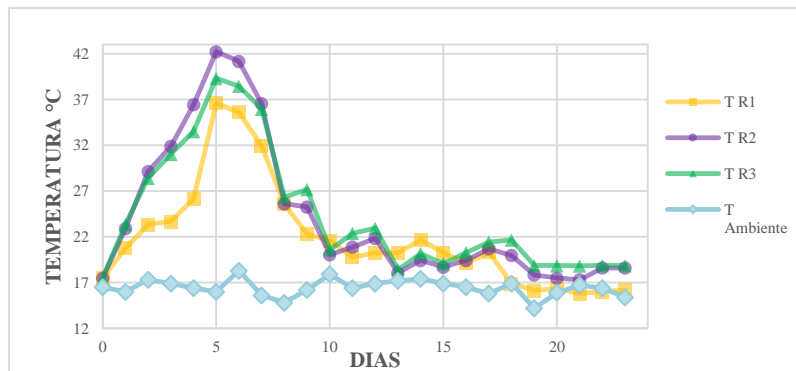
Nota. Representación de variables de inicio para la experimentación.

3.5.2 Resultados y análisis de resultados experimentación

3.5.2.a Temperatura. Esta variable es una de los indicadores más importantes dentro del proceso de compostaje, ya que permite evidenciar correctamente la actividad microbiana, teniendo en cuenta que la temperatura evoluciona con respecto al paso de los días en relación directa con la materia orgánica debido a la descomposición aeróbica. El proceso de compostaje se llevó a cabo en 30 días de los cuales se tomaron 24 mediciones de temperatura, durante el proceso en la Figura 23. Se puede evidenciar la etapa mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración de cada reactor.

Figura 15.

Perfil de temperaturas promedio de los reactores

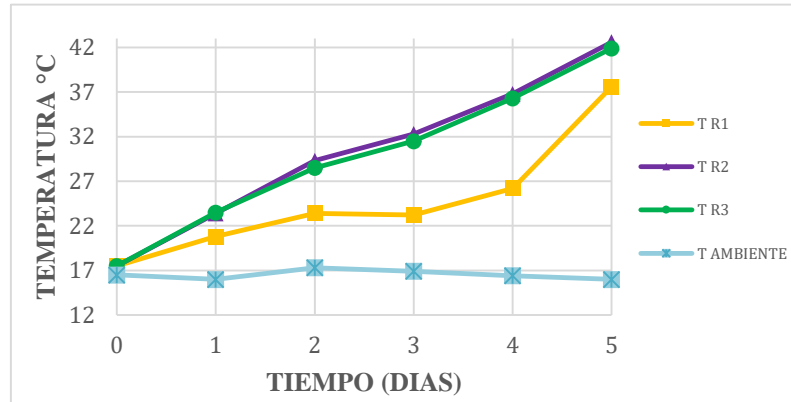


Nota. En la gráfica se muestra el perfil de temperaturas cada reactor, temperatura ambiente en la locación y la temperatura promedio de los 3 reactores.

Para realizar un análisis más profundo sobre el comportamiento de la temperatura se generaron las gráficas para cada reactor con las respectivas profundidades registradas, en las cuales se encuentra el perfil promedio de temperatura.

Figura 16.

Perfil de temperatura de los reactores a profundidad de 10 cm



Nota. En la gráfica se presenta el perfil de temperatura las primeras 5 días de cada reactor contrastadas con la temperatura ambiente de la locación.

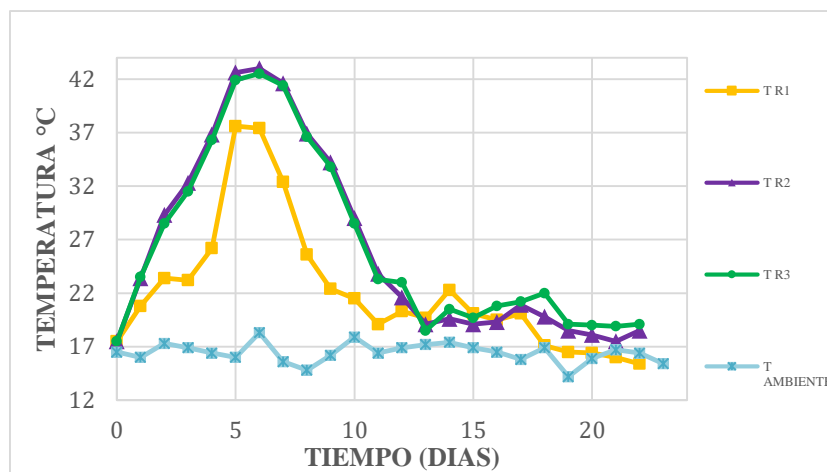
En la figura 24 se observa el comportamiento de la temperatura a una profundidad de 10 cm la cual representa la etapa inicial del proceso correspondiente a la fase mesófila. A esta profundidad la temperatura registrada después de realizar la carga, aislar y nivelar completamente el reactor cerrando las compuertas correctamente fue de 17.5 °C la cual coincide con la temperatura ambiente, esta temperatura no tuvo un incremento considerable debido a la humedad inicial del agente de carga y a las condiciones climáticas del lugar. En el reactor 2 y 3 se logra observar un comportamiento similar los primeros 5 días donde logran temperaturas máximas de 42.6 °C y 41.9 °C respectivamente las cuales hacen parte de la etapa termófila del proceso la cual inicio en el día 5. Por otro lado, el comportamiento del reactor 1 es diferente teniendo en cuenta que el incremento de temperatura no se dio de manera exponencial y la temperatura máxima que obtuvo fue de 37.6 °C esto podría atribuirse a la ausencia de oxígeno por presunta compactación.

Con respecto al inicio de la etapa termófila, la cual se caracteriza por tener temperaturas >40°C, en la figura 25 se observó un aumento mínimo de $\pm 1^\circ\text{C}$. Esta fase tuvo un tiempo de duración de 3 días alcanzando temperaturas máximas de 43°C Y 42.5°C para los reactores 2 y 3 respectivamente, se debe tener en cuenta que al no alcanzar temperaturas entre 55°C-65°C es complejo la degradación de moléculas como proteínas, ácidos grasos y polisacáridos como celulosa, hemicelulosa y particularmente lignina la cual conforma un porcentaje del 4% sobre el

agente de carga el cual en comparación con otros compuestos como residuos orgánicos y papel con 0.4% de lignina ; es porcentaje bastante alto generando así que el proceso se ralentice debido a su difícil biodegradación. adicionalmente no se logra la higienización de microorganismos patógenos teniendo en cuenta que las condiciones se vuelven desfavorables al disminuir rápidamente la temperatura esto genera que las bacterias sobrevivan formando endosporas las cuales vuelven a estar activas cuando las condiciones sean favorables [31]. Como se dijo anteriormente el reactor 1 no alcanzo la etapa termófila dentro del proceso, esto se puede atribuir a que el aislamiento del reactor no fue optimo y por esa razón pudo existir disipación de calor excesiva.

Figura 17.

Perfil de temperatura de los reactores a 10 cm de profundidad



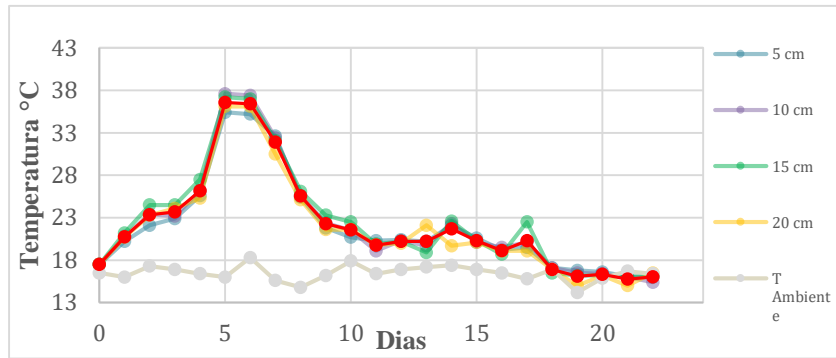
Nota. En el grafico se representa el comportamiento de la temperatura a la profundidad de 10 cm de la compuerta.

Luego de los reactores alcanzaran su máximo de temperatura, el sexto día el proceso comenzó su enfriamiento ($<40^{\circ}\text{C}$) hasta dar fin a la etapa termófila, esta etapa termino el día 10 como se observa en la figura 18, la cual evidencia el comportamiento de los 3 reactores por separado. Donde inicialmente el reactor 1 desciende de una temperatura promedio de 36.58°C a 21.58°C , el reactor 2 y 3 descienden uniformemente en promedio de 41.15°C a 22.45° , en esta etapa se realiza la última degradación de celulosas residentes y ligninas por bacterias y hongos formados. Por último, la fase de maduración dio inicio el día 10, donde se logró observar diferentes características organolépticas de color y olor mejorando su apariencia, siendo este color café marrón y olor a tierra húmeda como se evidencia en la Figura 19, estes olor se debe a un metabolito secundario

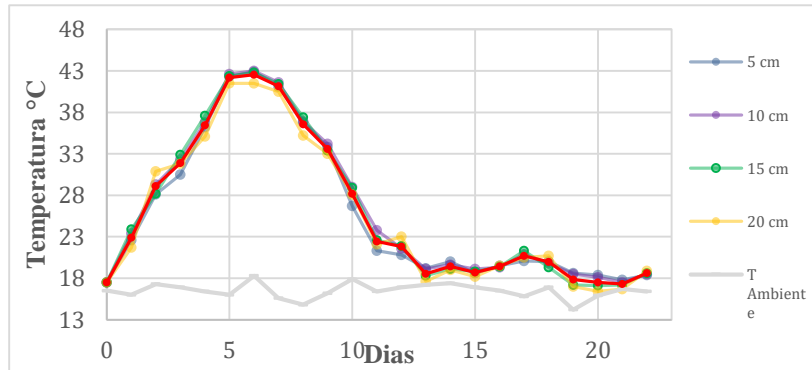
llamado Geosmina, el cual genera numerosos hongos, cianobacterias y actinomicetos. Este compuesto es generado cuando existe algún déficit nutricional que les impide seguir creciendo y proliferándose.

Figura 18.

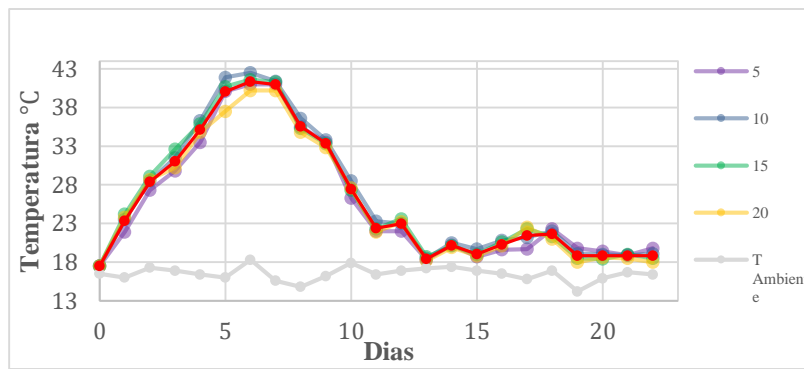
Perfil de temperatura en los reactores



(a)



(b)



(c)

Nota. En los gráficos se muestra el perfil de temperatura a las diferentes profundidades de 5, 10, 15 y 20 cm respectivamente, también se presenta la línea de temperatura promedio en el reactor y la temperatura ambiente de la locación. (a) Reactor 1, (b) Reactor 2 y (c) Reactor 3.

Por lo general esta limitación ocurre en la fase de maduración como se nombró anteriormente, donde la fracción de carbono orgánico ya no es asimilable y por ende se ralentiza el sistema, disminuyendo claramente la actividad biológica. El carbono que queda es difícil de metabolizar lo cual se ve en compost maduros con baja relación C/N.

Figura 19.

Etapa de maduración de los reactores



(a)

(b)

(c)

Nota. En la figura se puede visualizar la etapa de maduración de los 3 reactores siendo (a) Reactor 1 (b) Reactor 2 y (c) Reactor 3.

Adicionalmente, se evidenciaron el nacimiento de larva blanca comúnmente conocida como moscas del vinagre, la *Drosophila* se siente atraída por el material en descomposición y en ocasiones depositan huevos allí como se puede evidenciar en la figura 20, una vez esto ocurre las moscas pequeñas empiezan a salir y adicionalmente se ven caminando sobre el humus, no son dañinas así que no afecta el compostaje. Sin embargo, esto puede ocurrir en reactores los cuales no llegan a una fase termófila de higienización $>50^{\circ}\text{C}$ la cual permite que muera cualquier tipo de microorganismo invasivo.

Figura 20.

Larva blanca en muestra de compost

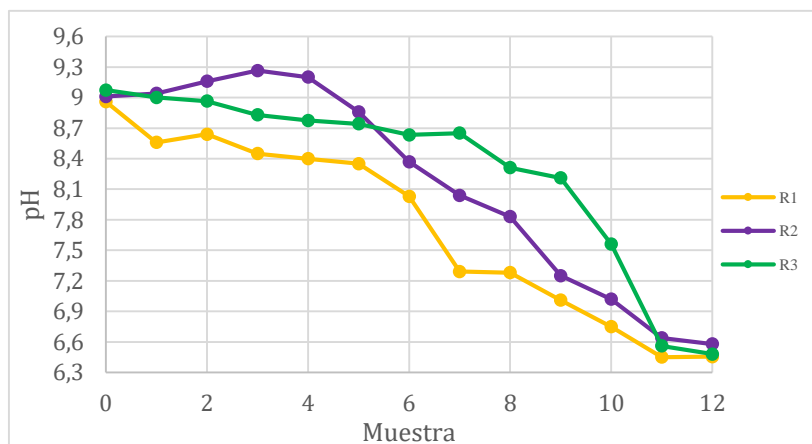


Nota. En la imagen se evidencia la presencia de larvas blancas de mosca negra las cuales son voraces como compostadoras

3.5.2.b pH. Con respecto a la variable pH, se tuvo en cuenta que este podría variar significativamente en cada uno de los puntos del reactor, por esta razón el muestreo fue significativo luego de cada agitación, al igual que formar la solución (mencionado en el protocolo de medición de la variable pH) las muestras se tomaron de 3 diferentes lugares del reactor, siendo el promedio de los valores obtenidos como el valor global de pH en cada uno de los reactores.

Figura 21.

Variación de pH en cada reactor durante los días de experimentación.



Nota. En la gráfica se presentan la variación de pH en cada reactor.

En la figura 29 se muestra la variación de pH de los tres reactores durante el tiempo del compostaje. En el inicio de la experimentación los reactores se encontraron en pH básico ya que el único factor influyente es el agente de carga el cual debe contar con un exceso de nitrógeno ya que el lodo inicialmente se encontraba a un pH de 7.05 neutro, inicialmente como se observó en la caracterización el que más aporta al estar en mayor cantidad de la mezcla es el que predomina en el pH. Los valores iniciales para el reactor 1, reactor 2 y reactor 3 son respectivamente 8.96, 9.01, 9.07. Para este proceso se hizo seguimiento cada tercer día generando así un total de 13 muestras en el mes, habiendo dicho lo anterior, los 3 reactores tienen comportamientos diferentes con respecto a la toma de muestras.

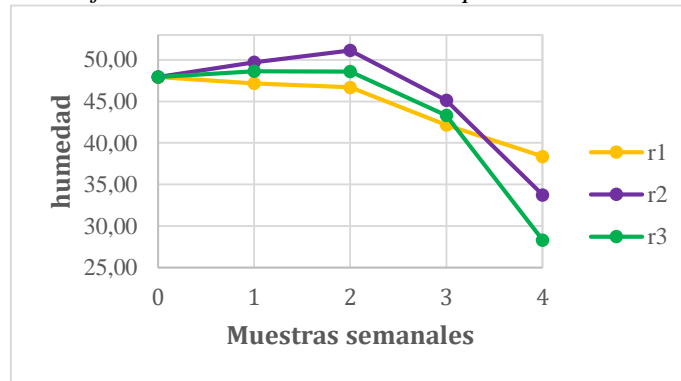
Los tres reactores emprenden un descenso de pH, el cual hace parte de la acidificación debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más cambiante, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Luego se inicia la fase termófila la cual debe presentar una alcalización, el único reactor que tuvo ese comportamiento es el numero 3 el cual sube hasta un valor máximo 9.27. los reactores 2 y 3 no alcanzan niveles superiores a los del ingreso al reactor sin embargo los tres a partir de la muestra 4 empiezan a disminuir significativamente, esto se puede presenciar teniendo en cuenta que dentro de los reactores se pudo generar zonas anaeróbicas por compactación lo cual genero exceso de producción de ácidos orgánicos, sin embargo hacia la etapa de enfriamiento en la muestra el proceso se acerca a la neutralidad con valores de 7.29 para el reactor uno el día 7 , 7.83 para el reactor dos el día 8 y 7.56 para el reactor tres el día 10, allí se suelen formar compuestos húmicos los cuales permiten que no descienda más el pH. Sin embargo, en la última semana el proceso desciende hasta un pH de 6.47, 6.50, 6.33 en el reactor 1, 2 y 3 respectivamente, varios autores ratifican que valores inferiores a la neutralidad son indicador de secciones anaerobias lo cual presenta un material que aún no se encuentra del todo madurado. Los valores finales obtenidos al final del proceso se encuentran dentro del rango que exige la NTC 5761 (2011)[32], donde requiere un valor mínimo de 4 y un máximo de 9 para abono orgánico.

3.5.2.c Humedad. Al principio del proceso la humedad fue fijada al cálculo correspondiente al balance de masa realizado para determinar las cantidades iniciales del proceso, siendo esta 47.95 % en promedio. Este valor de humedad se encuentra dentro del rango mínimo permitido para el

desarrollo del proceso de compostaje evitando taponamientos en los poros del material de compostaje que pueda interferir el transporte de oxígeno dentro de él.

Figura 22.

Porcentaje de humedad a través de la experimentación



Nota. En el grafico se define la humedad al pasar el tiempo de experimentación en cada uno de los reactores.

Para este parámetro se tomaron muestras cada semana iniciando por el día de carga a los reactores. En los reactores 2 y 3 se evidencia un leve incremento de la humedad inicial de 46.95% aun 51.14% y a un 48.60% en la semana 2. Este comportamiento se puede atribuir a la posible adición de humedad por parte del ambiente que se empleó para la aireación teniendo en cuenta que es época de invierno, al igual que la retención de humedad en las zonas anaerobias que se formaron dentro de los reactores. El reactor 1 tuvo comportamientos de humedad descendientes debido al exceso de aireación suministrado.

En la semana 3 luego del enfriamiento se observa un decrecimiento de la humedad llegando a 41.16% para el reactor 1, 45.13% para el reactor 2 y 43.32 % para el reactor 3, tal disminución se confiere cuando se vierte demasiado material seco, en este caso el exceso de agente de carga. Esto genera una baja de temperaturas de tal manera que el proceso se retarda haciendo que la maduración sea muy prolongada. Al finalizar el proceso en la semana 4, día 30 los tres reactores tienen un comportamiento similar en el decrecimiento presentado llegando a tener valores de 38.36%, 33.74% y 28.32% para el reactor 1,2 y 3 respectivamente, los cuales son permitidos ya que se encuentra en la etapa de maduración. Sin embargo, los valores obtenidos cuentan con un margen de error por debido a un erróneo análisis de la muestra lo cual se puede atribuir al poco

tiempo en el cual no se realizó la verificación de la humedad en peso constante. Por ende, de la misma muestra obtenida fue enviada una porción al Centro de biosistemas Jorge Tadeo lozano (Anexo 4) donde registra una humedad final de 48.98% la cual pertenece a una mezcla significativa de los 3 reactores, este valor indica la necesidad de realizar un acondicionamiento al material por medio de secado debido a que la humedad requerida para abonos orgánicos de acuerdo a la NTC 5167 (2011) [32] debe ser inferior o igual al 15%.

3.5.2.d Cenizas. El porcentaje de cenizas es el factor que permite conocer el comportamiento de la biodegradación durante el proceso, de igual forma permite conocer la calidad agronómica del producto obtenido. La biodegradabilidad indica la cantidad de materia orgánica que se ha descompuesto debido a la mineralización realizada por los microorganismos y a la disminución de carbono anhidrido. Durante este proceso los componentes complejos como celulosa y lignina se degradan lentamente hasta convertirse en compuestos húmicos como se mencionó anteriormente en la fase de enfriamiento.

La biodegradabilidad del proceso es posible estimarla por medio de un balance de energía en el cual la cantidad de cenizas es constante en el proceso. El balance se define por medio del coeficiente de degradación (K_b) que involucra la concentración de cenizas al inicio y al final del compostaje [15].

Ecuación 1. Coeficiente de biodegradabilidad

$$K_b = \frac{(C_f - C_i) * 100}{C_f * (100 - C_i)} * 100\%$$

Donde C_i y C_f son la concentración en porcentaje de cenizas iniciales y finales del proceso de compostaje respectivamente. A continuación, se muestran los coeficientes de biodegradabilidad de cada uno de los reactores.

Tabla 9.

Coefficientes de degradación en los reactores

reactor	% cenizas		%Kb
	iniciales	finales	
1	5,98	29,74	84,98
2	5,90	32,72	87,09
3	5,82	35,83	88,93

Nota. En la tabla se muestra la cantidad de cenizas iniciales, finales con el respectivo coeficiente de degradabilidad para cada reactor.

En base a los porcentajes obtenidos para cada reactor, se observa que en la tabla 9 la mayor biodegradación se alcanzó por parte del reactor 3 con un valor de 88.93% lo cual corresponde a la mayor velocidad de mineralización con respecto a los demás coeficientes de biodegradación obtenidos para los reactores 1 (84.98%) y 2 (87.09%). Con respecto al contenido de cenizas del producto al final del proceso se puede observar los valores obtenidos tanto en la experimentación como los obtenidos en la muestra entregada al centro de biosistemas Jorge Tadeo Lozano (Anexo 4) se encuentran dentro del valor exigido por la NTC 5167(2011) [32], la cual exige porcentajes <60% para abonos orgánicos.

Finalizado el proceso al realizar el secado correspondiente al compost obtenido se procede con un tamizado para así separar los componentes que no llegaron a descomponerse en su totalidad y así tomar en cuenta solamente el compost útil. Una vez realizada la operación se calculó el porcentaje de compost apto para la utilización agrícola a partir de la siguiente ecuación[33].

Ecuación 2. Porcentaje de Descomposición

$$\% \text{ Descomposición: } \frac{\text{Volumen del material tamizado}}{\text{Volumen total}} \times 100$$

Siendo el volumen total, la cantidad obtenida al final del proceso y el volumen del material tamizado, la cantidad de abono separada. En la figura 24 se muestra las cantidades obtenidas para cada parámetro. Por ende, se obtiene un 76.48% de descomposición lo cual refiere un excelente

comportamiento como compostaje dinámico ya que en [33] refiere que los compostajes anaeróbicos estáticos por lo general tienen porcentajes de degradación < 40%.

Tabla 10.

Porcentaje de descomposición en el compostaje

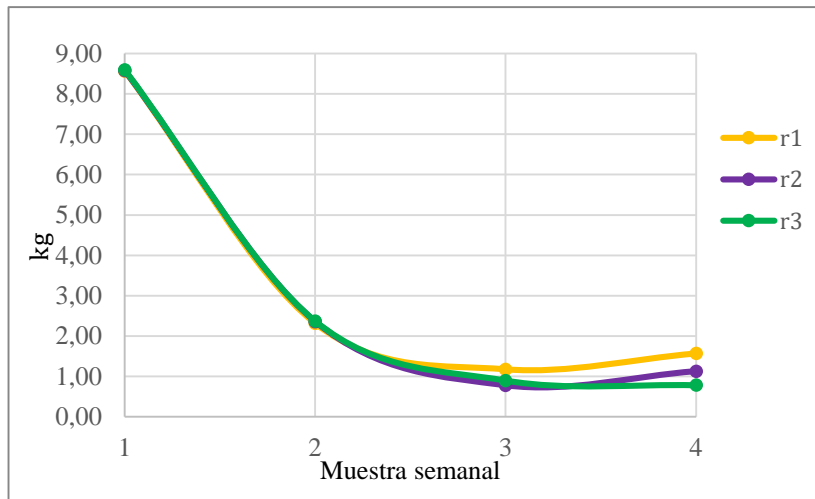
Muestra	Volumen total	Volumen grueso	Volumen tamizado	% Descomposición
1	10,63	10,63	8,14	76,58

Nota. En la tabla se presentan valores obtenidos por el proceso de tamizaje al contenido resultante del proceso de compostaje.

3.5.2.f Sólidos volátiles. Se denomina sólidos volátiles a aquellos componentes que se volatilizan cuando el material que es compostado se calienta a una temperatura de 550°C. Los componentes volatilizados pueden ser orgánicos o inorgánicos los cuales pueden variar dependiendo del material que se esté compostando. Este parámetro representa el contenido de materia orgánica de los residuos por lo tanto la figura 23 representa de biodegradación en los reactores.

Figura 23.

Variación de los sólidos volátiles en los reactores



Nota. En la gráfica se presenta la variación de sólidos volátiles con respecto a los días de compostaje en cada uno de los reactores

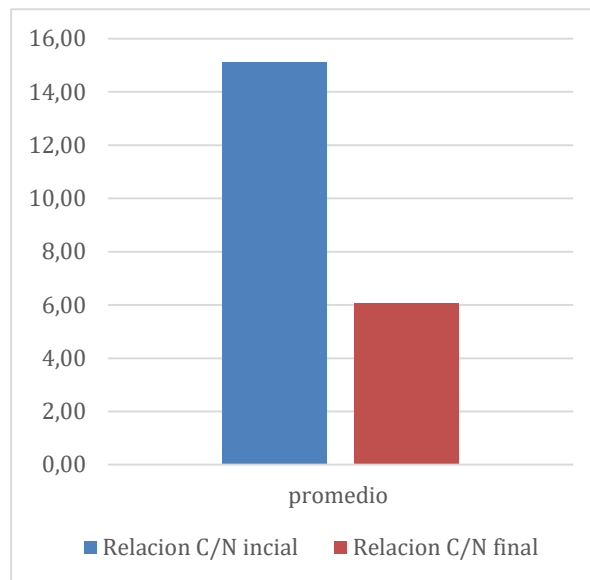
En la gráfica se observa el decrecimiento de sólidos volátiles durante el proceso, lo cual consiste en la biodegradación presentada en cada reactor durante el compostaje ya que la mayoría de iones metálicos reaccionan con las sustancias húmicas, las cuales pueden amortiguar el pH y servir como fuente de nutrientes para el proceso [34]. Por otro lado, se observa que la mayor pérdida de sólidos volátiles se da en la primera semana de compostaje en sistemas aerobios como lo indica [35]. Al inicio del proceso los tres reactores contaban con 8.58 kg de sólidos volátiles, este valor decrece drásticamente cerca de un 73% del valor inicial dejando valores de 2.31, 2.36, 2.37 para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente. , se puede deducir que esto se dio durante la primera y segunda fase, donde se incrementaron los malos olores debido a la producción de diversos componentes generados a causa de múltiples rutas fermentativas, destacando entre ellas sustancias como: hidrogeno sulfurado, fenol, aminas, amoniaco, etc. [36] Adicionalmente para la semana 3 y 4 del proceso se tiene en cuenta que la cantidad de sólidos volátiles fue prácticamente constante dejando valores de 1.57 kg para el reactor 1, 1.13 kg para el reactor 2 y 0.78 kg para el reactor 3, este material volátil hace parte del compostaje parcial o compost curado. Es importante aclarar que durante el proceso no se generaron lixiviados, debido a la gran cantidad de agente de carga agregado al proceso ya que como se mencionó anteriormente no hubo un aumento de humedad.

3.5.2.g Relación C/N. La caracterización química más importante de los sustratos en su composición elemental, los componentes involucrados en las materias primas empleadas se caracterizan por tener macro constituyentes como lo son el carbono y el nitrógeno los que son esenciales para el crecimiento microbiano. El rango óptimo para un proceso de compostaje se encuentra entre 15 y 35 [8], [12].

Al inicio el proceso la relación C/N se calculó igualmente para cada uno de los reactores, lo anterior se puede visualizar en la tabla 7; para la determinación de C/N al final del proceso se realizó un muestreo homogéneo de los 3 reactores el cual se integró y se llevó a analizar en el centro de biosistemas de la universidad Jorge Tadeo Lozano (Anexo 4).

Figura 24.

Comportamiento relación C/N en el proceso



Nota. En la gráfica se evidencia el comportamiento promedio de los reactores 1, 2 y 3 en el proceso de compostaje

En la experimentación se llevó a cabo una relación C/N que se propone por medio de balances de materia encontrándola dentro de un rango permisible, la cual deja llevar a cabo la degradación. En la figura 27 se observa el valor inicial y el valor final promedio de los 3 reactores, esta reducción se dio cerca de un 40% dejando un valor final de 6.06, se puede tener en cuenta que un compost es suficiente mente estable o maduro cuando tiene una relación C/N >20. Si los compuestos utilizados tienen relaciones muy bajas es posible que la degradación se haya dado de manera rápida autorregulando el exceso de nitrógeno como amoniacal en el proceso[37]. Para realizar un análisis más detallado del carbono y nitrógeno final del proceso se genera la figura 28.

Tabla 11.

Carbono total y nitrógeno total al final del proceso

PARAMETRO	Reactor	
	promedio	NTC 5167
Carbono total final (% base seca)	26,68	>15
Nitrógeno total final (% base seca)	4,4	>1

Nota. En la tabla se especifica el carbono y nitrógeno total promedio obtenido al final del compostaje en los 3 reactores.

De acuerdo con la anterior tabla se puede decir que la cantidad de nitrógeno total carbono total oxidable para el promedio de los 3 reactores cumple con lo exigido en la NTC 5167(2011) [32].

3.5.3 Balance de componentes en el proceso

Se realizó un balance de masa global (Anexo 5) donde inicialmente los valores finales del abono son entregados por el centro de biosistemas de la universidad Jorge Tadeo lozano y se supone que los valores finales del césped a recircular contendrán la misma composición inicial las cuales fueron obtenidas a partir de [18], [38]. Todo lo anterior debido a que por temas presupuestales no se pudo realizar el análisis inicial ni final a este residuo.

La descomposición de residuos orgánicos mediante el proceso de compostaje, genera emisiones de gases los cuales suelen ser constituidos en su mayoría como CO₂, N₂O, CH₄ O NH₃ los cuales contribuye al calentamiento global [39]. Según [40] el GWP (Potencial de calentamiento global) estimar las emisiones de diferentes gases y permite comparar diferentes oportunidades de reducción de emisiones entre sectores; El CO₂ tiene un GWP de 1 independientemente del tiempo que permanece en el sistema climático cercano a 100 años, por el contrario, el CH₄ cuenta con un GWP de 25 a 36 el cual tiene una durabilidad de una década en promedio sin embargo absorbe mucha más energía que el dióxido de carbono por lo tanto lo hace precursor del ozono. De acuerdo con lo anterior para un periodo de 100 años en términos de GWP siendo 1 para el CO₂, el metano

cuenta con 25, cual implica que el metano constituye 25 veces más (en cantidades másicas) al efecto invernadero.

Para la estimación de CO_2 emitido durante el proceso de compostaje se asume que el carbono degradado en el proceso se convierte en su totalidad en CO_2 ya que por lo general el CH_4 se produce en ambientes de bajo contenido de oxígeno, anaerobiosis o en sistemas aerobios con poca difusión de oxígeno [41]. Por medio del balance de materia en la unidad de compostaje (Anexo 5) teniendo en cuenta el ingreso de la mezcla de materia prima (m_3), ingreso de aireación (m_4) suponiendo que la composición de esta corriente es de 21% Oxígeno y 78% Nitrógeno, salida del proceso de compostaje (m_6) y por último la salida de emisiones (m_5) del reactor en unidades másicas. Inicialmente se realiza el balance sobre la cantidad de carbono que ingresa y la que sale del reactor en unidades másicas.

$$C_3 - C_6 = C_5$$

Posteriormente se realiza la conversión a moles (C_5) por medio de la división del peso molecular del carbono. (u hace referencia a unidad de masa atómica)

$$\frac{(C_5)}{12.0107 u} = NC_5$$

Por último, se multiplica el número de moles de carbono con el peso molecular del CO_2 , obteniendo así la cantidad de CO_2 emitido en el proceso

$$NC_5 * (12 u + (16 * 2)) = CO_2$$

$$NC_5 * (44 u) = CO_2$$

En la tabla 12 se presentan los resultados de las cantidades de CO_2 emitido a la atmosfera durante el proceso de compostaje propuesto para el reactor promedio.

Tabla 12.*Cantidades de carbono estimadas en el proceso de compostaje*

Parámetro	R promedio
C ₃ (kg)	4,41
C ₆ (kg)	0,59
C ₅ (kg)	3,82
CO ₂ (kg)	13,99

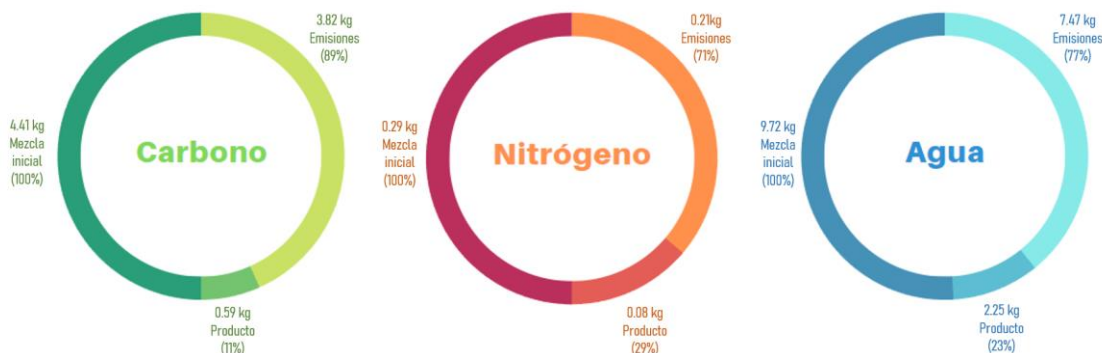
Nota. En la tabla se presenta la cantidad de carbono al inicio, final en emisiones y emitido en forma de CO₂, a la atmosfera.

Por lo tanto, si la disposición final de los residuos utilizados dentro del proyecto se da en un relleno sanitario, las cantidades de CO₂ entregadas a la atmosfera estarían estimadas entre 250-390 Kg de CO₂ / Ton de residuo [42] y adicionalmente al generarse zonas de compactación se libera metano el cual es 25 veces en cantidades másicas el CO₂ emitido. Por ende, el proceso de compostaje tiene menor incidencia sobre el efecto invernadero.

Por otro lado dentro de las emisiones generadas en la corriente 5 se puede evidenciar la perdida de agua en forma de vapor durante el proceso de compostaje, ya que al iniciar el proceso se contaba con 9.72 kg de agua contenida en la mezcla de materias primas de la cual se emite 7.47 kg de agua en forma de vapor al finalizar el proceso, la perdida de agua más grande se dio durante la primera semana donde se evidencio una reducción del 35% aproximadamente la cual se dio en la fase termófila del proceso. Por último, la perdida de N durante el compostaje suele ser muy variable debido a la mineralización, nitrificación y desnitrificación del proceso desprendiéndose en forma de NH₃ [43]. En el proceso la perdida de nitrógeno por emisión con respecto al inicial y al fijado en el producto saliente del reactor es de 72% el cual ocurre principalmente las primeras semanas del proceso; no obstante, de las emisiones liberadas el 98% es asignado al NH₃ y el 2% remanente se refiere al N₂O y N₂ [43].

Figura 25.

Contenido inicial y final de compuestos



Nota. En la figura se evidencia el comportamiento del agua, carbono y nitrógeno en el proceso de compostaje, se expresan los kilogramos y porcentaje de reducción emitidos como gas y alojados en el producto con respecto al producto inicial.

Con respecto a los diferentes nutrientes como P, K, Ca, Mg, Na, el análisis de estos sobre su contenido en el abono orgánico sirve para agregar propiedades benéficas sobre el suelo o zonas agrícolas. Inicialmente se obtiene una disminución importante de nutrientes durante el proceso de compostaje, lo cual se puede atribuir a la disminución humedad y a algunos residuos de gran tamaño los cuales no pudieron ser asimilados por los microorganismos y por lo tanto no se pudieron degradar [44]. Sin embargo, el abono obtenido cuenta con %P de 1.12 el cual cuenta con un papel importante sobre la resistencia a la sequía, %K de 0.71 el cual proporciona resistencia a las plagas y enfermedades, %Ca de 1.28 es importante para la formación de paredes celulares, Mg de 0.28 el cual forma parte de la clorofila y % Na de 0.12 el cual ayuda a la alcalización del suelo.

4. ESCALAMIENTO DEL PROCESO

Este capítulo se desarrolla el método empleado para el escalamiento del reactor horizontal rotatorio, al igual que cada especificación pertinente para los equipos adicionales empleados para la adecuación tanto de materia prima como del postratamiento del producto obtenido. El escalamiento del reactor horizontal se realiza por medio de un método que emplea el factor de escalamiento basado en el flujo de calor disipado y de generación, las cuales involucran los principios de similitud geométrica, dinámica y cinemática.

4.1 Reactor rotatorio horizontal

Para el dimensionamiento de un reactor con mayor capacidad, se han desarrollado diferentes modelos matemáticos para la elaboración de sistemas de compostaje, dichos modelos se encuentran regidos por la cinética y termodinámica del proceso. La mayoría de modelos requieren parámetros como lo son la concentración de gases emitidos (CO_2 o O_2), los cuales para este proyecto no fueron determinados al no contar con los equipos o instrumentos necesarios. Por otra parte, también existen medios físicos como lo emplean en [45], donde se utiliza una unidad de laboratorio que permita dimensionar las pérdidas de calor por convección buscando una simulación de un proceso a mayor escala, el cual pueda compensar los efectos de la relación de Área : Volumen [46]. Para poder llevar a cabo el proceso de escalamiento por el modelo ya enunciado, [45] sugiere asumir la misma humedad a escala laboratorio en el sistema piloto, debido a que es una variable por la cual se puede generar un control de manera adecuada en cualquier escala de trabajo. Al igual que también sugiere asumir la no alteración de la concentración de oxígeno y otros productos gaseosos generados, al no verse ligados directamente con el aumento en las dimensiones de un sistema de aireación forzada. Se debe aclarar que el escalamiento a realizar será diseñado para un reactor rotatorio el cual se encontrará en reposo.

En el modelo empleado por [45] se centra en plantear una relación directa entre la variable temperatura con el Área: Volumen. Esta relación establece un factor de escalamiento (B_G), en el cual las tasas de calor disipado por área superficial (T_d), y el calor generado por el volumen (T_g) a compostar se relacionan.

Ecuación 3. Factor de escalamiento

$$B_G = \frac{A}{V} = \frac{T_d}{T_g} = \frac{-k * F * \Delta T}{H_{rx} * \lambda * V * S}$$

Este factor de escalamiento es adimensional y debe mantenerse entre el modelo a escala y el modelo laboratorio, con el fin de asegurar un comportamiento similar de la temperatura en ambos sistemas. Para la tasa de calor generado se tiene la siguiente expresión:

Ecuación 4. Tasa de calor generado

$$T_g = H_{rx} * \lambda * V * S$$

Donde

H_{rx} : Entalpia de reacción de degradación (J/mgSVB)

λ : Tasa específica de reacción (1/s)

V: volumen reaccionante (m³)

S: Concentración del sustrato (mgSVB/ m³)

De la misma manera también se define la tasa de disipación de calor de manera conductiva a través de la superficie de la figura geométrica del equipo empleado escala laboratorio y a escala piloto.

Ecuación 5. Tasa de calor disipado

$$T_d = q = -k * F * \Delta T$$

Donde

q: Flujo de calor de manera conductiva (J/s)

k: Conductividad térmica del material (W/m°C)

F: Factor de forma geométrica del sistema (m)

ΔT = Diferencia de temperatura entre puntos de interés (°C)

Una vez definidas las tasas de calor se procede a la determinación de los valores que deben mantenerse para lograr el escalamiento por medio de la igualación de los factores de escalamiento para el modelo y el prototipo.

Ecuación 6. Igualación factor de escalamiento

$$(B_G)_{prototipo} = (B_G)_{modelo}$$

Ecuación 7. Definición de igualación factor de escalamiento

$$\left(\frac{-k * F * \Delta T}{H_{rx} * \lambda * V * S} \right)_{prototipo} = \left(\frac{-k * F * \Delta T}{H_{rx} * \lambda * V * S} \right)_{modelo}$$

De la anterior expresión se puede realizar las respectivas simplificaciones de algunos términos que no se encuentran en función de la escala geométrica y pueden ser constantes a escala laboratorio y piloto. El primer término que se simplifica es el de la entalpia de reacción la cual no depende del cambio geométrico que esta sufra, por otro lado, también se realiza la tasa de reacción y de la concentración del sustrato debido a que estas condiciones no cambian en la escala piloto o laboratorio al encontrarse a la misma temperatura [45].

Ecuación 8. Simplificación igualación escalamiento

$$\left(\frac{-k * F * \Delta T}{V} \right)_{prototipo} = \left(\frac{-k * F * \Delta T}{V} \right)_{modelo}$$

La expresión obtenida anteriormente permite realizar el escalamiento, en el cual el volumen reaccionante y el factor de forma cambien considerablemente. Por ende, es necesario mantener la igualdad y compensar dichos cambios manipulando la conductividad térmica del material a utilizar y el gradiente de temperatura alrededor del volumen reaccionante. Con respecto al factor de forma de la unidad experimental es de forma cilíndrica y está representado por la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Factor de forma

$$F = \frac{2 * \pi * H}{Ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

Donde H es la longitud característica del cilindro, mientras r_o y r_i son el diámetro interno y externo respectivamente.

Luego de un análisis de situación real y de aplicación a escala laboratorio, [45] encuentra que hay una relación entre el volumen y la geometría de la pila a modelar y el gradiente de temperatura que debe mantener una unidad de compostaje empleada en el laboratorio. Luego de despejar a la ecuación 6 donde se implementa el factor de forma cilíndrico, se obtiene la ecuación 8 la cual permitirá la variación de dimensiones a las que se desea modelar la unidad piloto, el subíndice P se refiere a la unidad piloto y el subíndice m se refiere a la unidad de modelo laboratorio.

Ecuación 10. Cambio de temperatura requerida laboratorio

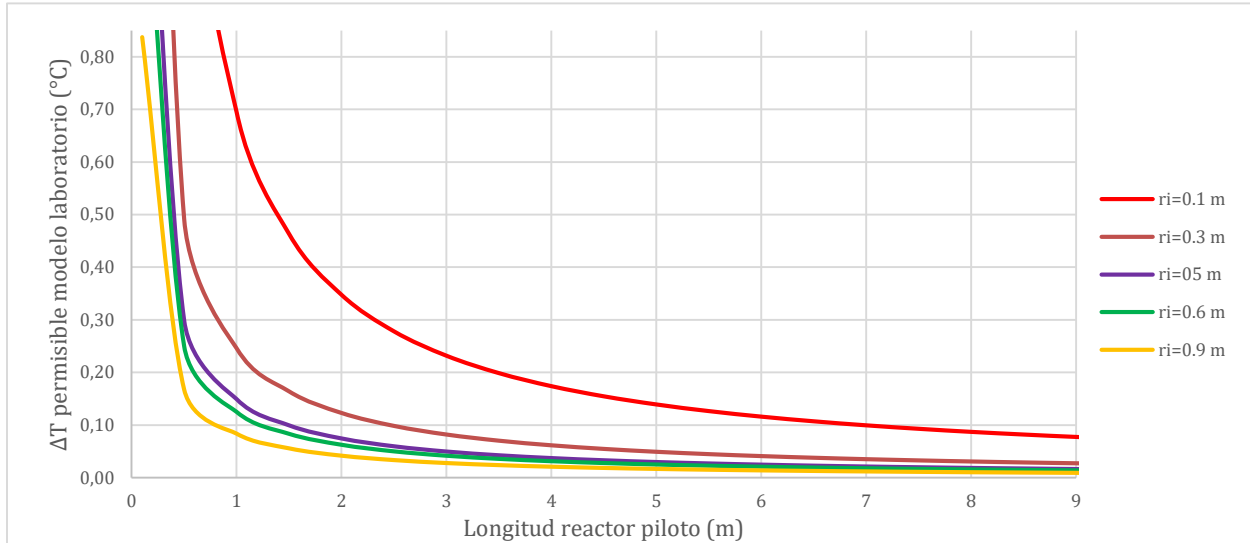
$$\Delta T_m = \frac{k_p F_p \Delta T_p V_m}{k_m F_m V_p}$$

El volumen reaccionante (V_m) empleado durante la modelo escala laboratorio fue de 0.036 m³, mientras que la conductividad termina (K_L) para el poliuretano es de 0.039 W/m*K. Para la escala piloto se requiere que el diferencial de temperatura de temperatura (ΔT_p) entre el límite del material del compostaje y la pared interna del reactor sea menor con el fin de simular la menor pérdida de calor posible, por lo tanto, se tomara un valor de 1°C cuando el reactor alcance el máximo de temperatura. Con respecto a la selección del material para el reactor se va a emplear acero inoxidable el cual tiene una conductividad térmica (K_p) de 19 W/m*K, lo cual prevendrá daños en el equipo debido a la generación de diferentes componentes, el espesor de la pared es de 0.02 m (5/8") [47].

Con respecto al volumen reaccionante a escala piloto se determina por medio de relaciones entre la cantidad de lodo y los agentes de carga obtenidos en el capítulo 2 de diagnóstico, para ello se establece que el reactivo limite es la poda de césped, ya que se produce en menor cantidad de acuerdo a la tabla 3 (Cantidades másica y volumétricas de cada materia prima producida al mes). La relación directa seria por cada kilogramo de poda de césped se debe adicionar 0.64 kg de lodo residual; obteniendo así una cantidad de procesamiento cercana a 1969 kg, lo cual corresponde a 2.73 m³ (V_p) a compostar en el reactor (Calculado con la densidad aparente del césped teórica de 440 kg/m³). Si se quisiera tratar la cantidad total del lodo se deberá adquirir la cantidad faltante de césped, regulando la cantidad adquirida dentro del municipio, con fincas locales o con industrias cercanas que requieran disponer de residuos verdes, al igual se puede implementar un reciclaje de material compostado con el fin de utilizarlo como un activador del proceso. Como en el modelo de laboratorio no se empleó un filtro encargado del tratamiento de los gases emitidos en el proceso, por seguridad para una mayor escala se toma la decisión de llenar un 60% de la capacidad del reactor, lo cual se aplica de igual forma en el reactor escala piloto a consecuencia a esta consideración el reactor debe ser de aproximadamente de 4.55 m³ de capacidad.

Figura 26.

Relación entre dimensiones escala piloto y modelo laboratorio



Nota: relación entre dimensiones escala piloto con respecto al diferencial de temperatura permisible a escala laboratorio.

Con ayuda de la figura 27 se puede hacer la selección de las dimensiones del reactor escala piloto para ello es necesario identificar la curva que representa un comportamiento asintótico a unas dimensiones requeridas. Inicialmente para el radio interno equivalente 0.1 m no alcanza la condición. Por otro lado, el radio interno equivalente de 0.3 alcanza la condición a una longitud de 5 m dando así un volumen equivalente de 1.61 m^3 el cual es mucho menor al que se requiere como mínimo. Para un valor de 0.5 m de radio interno la condición se alcanza aproximadamente a una longitud de 4 m, lo cual representa un volumen de 3.40 m^3 el cual sigue siendo pequeño para el requerido. Con respecto al radio 0.6 m alcanza la condición permisible a una longitud de 3.5 m, lo cual representa un volumen de 4.23 m^3 el cual se aproxima a la cantidad de volumen a compostar, sin embargo, no es suficiente al faltar 0.32 m^3 y tomando por último para el radio de 0.9 m se cumplió la condición permisible para una longitud de 3 m, formando así un volumen de 7.98 m^3 el cual ya es muy grande para la cantidad de material a compostar.

De acuerdo con lo analizado previamente se concluye que el reactor más cercano al requerimiento

necesario deber contar con unas dimensiones equivalentes a 0.6 m de radio interno, 3.5 m de longitud y un volumen de 4.23 m³. Esto solo es posible si se accede a cambiar la capacidad extra considerada para los gases producidos dentro del reactor de un 40% a 35%

Dando así un volumen necesario de 4.20 m³ esta aproximación no incide ni hace parte del fundamento base del escalamiento, solo afecta la tolerancia que se había establecido para los gases.

Figura 27.

Esquema del reactor



Nota: Diseño de reactor escala piloto.

Para la elección del material del reactor se toma en cuenta 2 materiales debido al alto nivel de corrosividad de los compuestos a mezclar. Inicialmente se toma en cuenta el acero inoxidable el cual es una aleación de acero con un 10% de cromo lo que lo hace resistente a la corrosión ya que el cromo posee una excelente afinidad con el oxígeno que conforma su capa pasiva protegiéndolo de manera eficaz sin embargo es un producto de alto costo [48], por ende, se toma en cuenta la tubería de gran diámetro elaborada de polietileno de alta densidad (HPDE) el cual es resistente a la corrosión, es liviano, ligero y económico. Con respecto a la base de rotación se va a emplear perfiles de acero, sus dimensiones van a ser de 1.50 m de ancho, 0.6 m de alto y 3.6 m de largo lo cual se puede evidenciar en la figura 28, los planos de las respectivas piezas se pueden evidenciar en el Anexo 6. En el interior se la base va a estar instalado el sistema de rotación por medio de ruedas de fricción y el cual va involucrar dos motores de 3.7 hp cada uno debido a que la cantidad de potencia requerida es de 6.5 hp para poder mover la cantidad de masa requerida y tener 4

revoluciones por minuto; los cálculos de potencia requerida se pueden evidenciar de la siguiente manera:

Inicialmente se determina el peso (W) de la masa contenida a mover

$$W = m * a$$

$$W = 1969 \text{ kg} * 9.8 \frac{m}{s^2} = 19298.5 \text{ N}$$

Luego se determina la velocidad lineal partiendo de asumir un requerimiento de 4 rpm

$$v = 4 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60 \text{ seg}} * 0.6 \text{ m} = 0.2513 \frac{m}{s}$$

Una vez determinada la velocidad y la fuerza, se procede a calcular la potencia requerida para mover la cantidad de carga del reactor.

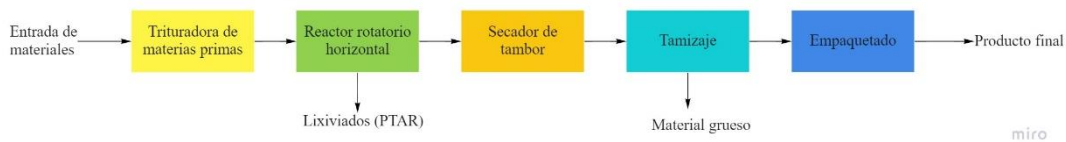
$$P = F * v$$

$$P = 19298.5 \text{ N} * 0.2513 \frac{m}{s} = 4850 \frac{J}{s} \cong 6.5 \text{ hp}$$

Por último, aunque a nivel laboratorio no se presentaron lixiviados, a escala piloto por medio de una válvula de ½ pulgada ubicada al extremo del reactor, podría presentarse una evacuación similar a la forma propuesta en los reactores laboratorio. Si esta situación se llega a presentar lo importante es que los lixiviados sean recirculados, junto con los lixiviados obtenidos en los lechos de secado, hacia la PTAR con el fin de que sean tratados debidamente.

Figura 28.

Diagrama de bloques del proceso propuesto



Nota. En la figura se representa el proceso propuesto con cada una de las operaciones unitarias a emplear.

Para determinar las unidades complementarias del proceso, se realizó un balance de materia escalado (Anexo 5), en el cual se tiene en cuenta que la carga inicial es de 1969 kg de los cuales 1200 kg y 769.2 kg a césped y lodo respectivamente. Así como en el proceso a escala laboratorio se tiene en cuenta la reducción de material al 79% de la masa inicial teniendo en cuenta que el


proceso donde se obtiene una masa de compost de aproximadamente 413.53 kg el cual será sometido a retirar el exceso de humedad por medio de un secador giratorio el cual retirará el exceso de agua hasta alcanzar una humedad $\leq 15\%$. Todo lo anterior asumiendo que el comportamiento es exactamente igual al de la escala laboratorio.

4.2 Unidades complementarias

El proceso propuesto requiere de unidades complementarias para lograr la producción de un abono orgánico de calidad, como lo son: la trituradora para las materias que ingresan al reactor y que requieren de un tamaño de partícula determinado; un secador para el producto obtenido a la salida del reactor con la finalidad de disminuir la humedad contenida a niveles requeridos, al igual que eliminar trazas de patógenos, y homogenizar el producto y por ultimo un tamiz vibratorio el cual permitirá retirar el material no degradado, así pueda ser reutilizado. A continuación, se realiza la descripción técnica de cada una de las unidades complementarias.

Figura 29.

Ficha técnica trituradora de césped y lodo residual

FICHA TECNICA- TRITURADOR DE LODO Y CESPED	
	<p>MARCA : Trapp MODELO: JTR 200 NOMBRE : Triturador de residuos de compostaje PRODUCCION : 500-100 kg/h TIPO: MONOFASICO O TRIFASICO POTENCIA DE MOTOR: 1,25 - 1,5 hp TAMAÑO DE PARTICULA DE ENTRADA: 150-200 mm TAMAÑO DE PARTICULA DE SALIDA: 0,5-25 mm PRECIO: 465,65 USD</p>

Nota: En la figura se muestra la ficha técnica del equipo triturados, dando especificaciones sobre marca, modelo, capacidad, tipo y precio. Tomada de: Catalogo No. 1111-230, Branches y organic shredder, Metalúrgica Trapp LTDA, Brasil. Disponible: <https://www.trapp.com.br/uploads/produtos/manual-produto-293.pdf>.

Figura 30.

Ficha técnica secador saliente del reactor

FICHA TECNICA- SECADOR DE TAMBOR ROTATORIO	
	<p>MARCA : HENTO MODELO: HT-SQJ4E NOMBRE : Secador de tambor PRODUCCION : 50-80 kg POTENCIA DE MOTOR: 18 Kw VELOCIDAD DE GIRO: 3-6 rpm PRECIO: 990,0 USD ORIGEN: Henan, China CERTIFICACIÓN: ISO 9001</p>

Nota. En la figura se muestra la ficha técnica del equipo el cual cuenta con especificaciones y precio de adquisición. Tomado de: Henan (2018) Secador de tambor rotatorio. [Online]. Disponible: <https://n9.cl/aghm2>

Figura 31.

Ficha técnica tamiz vibratorio

FICHA TECNICA- TAMIZ RECTANGULAR VIBRATORIO	
	<p>MARCA : TYRONEB15:P34 MODELO: TZS-140 NOMBRE : Tamiz Vibratorio PRODUCCION : 100 kg/h POTENCIA DE MOTOR: 1/4 hp DIAMETRO DE MALLA: 2-8 mm PRECIO: 950,0 USD ORIGEN: Guangdong, China CERTIFICACIÓN: ISO 9001</p>

Nota. En la figura se muestra la ficha técnica del equipo de tamizado, dando especificaciones sobre el equipo y su precio de adquisición. Tomado de: Guangzhou Tyrone plastic machine co. LTD. (2020) industrial eléctrico de la vibración tamiz/rectangular lineal vibración tamiz. [Online]. Disponible: <https://n9.cl/wuiz5>

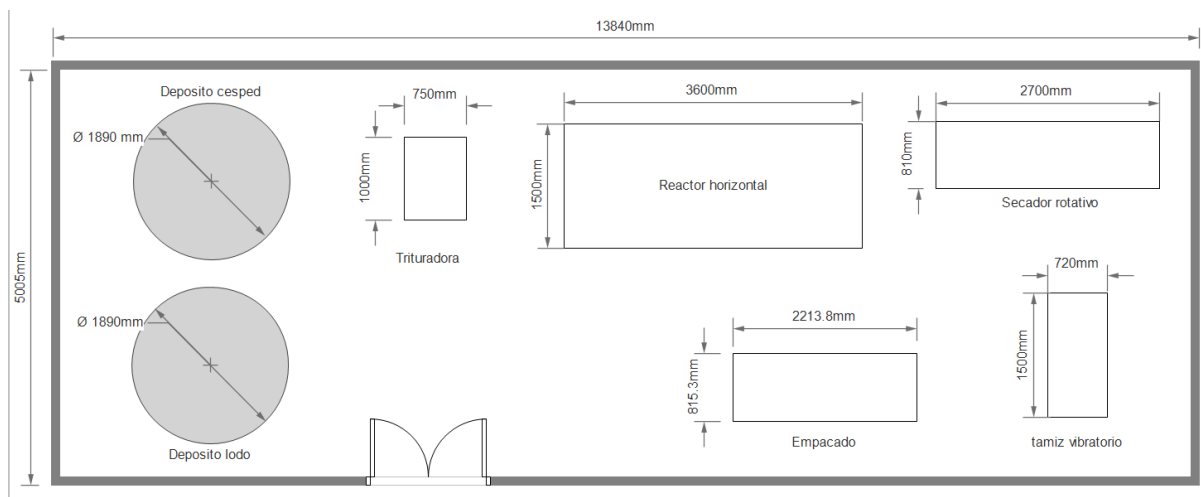
4.3 Área del proceso de compostaje

Para realizar el proceso de compostaje a gran escala se deben tener en cuenta ciertos factores dimensionales por lo cual se realiza un análisis para delimitar el área requerida en el proceso de producción. En el plano realizado (Figura 32) se visualiza la instalación del reactor, espacio de

trituration, secado, tamizado y empaçado. Inicialmente la planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en una zona rural del municipio, donde el espacio asignado debe ser deshierbado y se debe retirar el pasto para después cementar el suelo con el fin de que el área quede uniforme y en dado caso de que dentro del proceso se generen lixiviados no se genere ninguna filtración y por el contrario se puedan recoger para así ser evacuados al proceso de tratamiento de aguas residuales; adicionalmente se requiere de adecuaciones dentro de la infraestructura donde se debe tejar el espacio para así proteger cada uno de los equipos incorporados dentro del sistema y así prolongar su vida útil. En cuanto a las materias primas como la poda y el lodo residual se contará con un área de recepción y por último para el empaquetamiento y almacenado dentro de la misma ubicación puede asignarse un espacio dentro de la planta para así evitar costos de traslado.

Figura 32.

Plano de área requerida para el escalamiento



Nota. En la figura se puede visualizar el plano presentado para el escalamiento del proceso de compostaje para la planta de tratamiento de aguas residuales el municipio de Funza, Cundinamarca.

Para el almacenamiento del producto se tiene en cuenta la cantidad producida por mes, como se explicó previamente la cantidad de abono obtenida se encuentra cercana a los 300 kg al mes los cuales, al ser almacenados en bolsas de 10 kg, lo cual sería una producción pequeña la cual se puede almacenar dentro del cuarto de almacenamiento de la PTAR. Todo lo anterior se realizó como un estimado para una planta piloto de compostaje, pensando en obtener información sobre escalado a nivel industrial.

5. ANALISIS DE COSTOS DEL PROCESO

En este capítulo se realiza un análisis de los costos requeridos para llevar a cabo la implementación y desarrollo del proceso de compostaje aerobio a escala piloto por medio de un reactor horizontal discontinuo. Los costos son divididos en los costos de mano de obra, costos de inversión inicial, costos directos y costos indirectos de producción.

Tabla 13.

Precios del mercado local

Marca	Precio (COP)
Terrafert	\$ 24.552
Fulvot	\$ 25.666
Abonissa	\$ 26.400

Nota. En la tabla se presentan los precios propuestos para productos de 10 kg por tres diferentes empresas de abono orgánico en el comercio actual.

Para nuestro proceso se obtiene alrededor de 300 kg de abono al mes, los cuales se propone venderlos en una presentación de 10 kg. Basándonos en los precios ofrecidos en el mercado promedio de \$25.539 COP, se propone establecer un precio de venta asequible de \$24.300 COP. Los clientes potenciales del producto serian fincas, huertas locales y productores de flores ubicados dentro del municipio de Funza y a sus alrededores los cuales corresponden a la sabana de Bogotá. Con el fin de contribuir a un desarrollo próspero y ambiental dentro de los agricultores del municipio.

Tabla 14.*Ingresos estimados de la propuesta de compostaje*

Bultos mensuales de compostaje	Ventas del 100% de bultos	Ventas al año
30,0	\$ 729.000,0	\$ 8.748.000,0
30,0	\$ 765.450,0	\$ 9.185.400,0
30,0	\$ 803.722,5	\$ 9.644.670,0
30,0	\$ 843.908,6	\$ 10.126.903,5
30,0	\$ 886.104,1	\$ 10.633.248,7
30,0	\$ 930.409,3	\$ 11.164.911,1
30,0	\$ 976.929,7	\$ 11.723.156,7
30,0	\$ 1.025.776,2	\$ 12.309.314,5
30,0	\$ 1.077.065,0	\$ 12.924.780,2
30,0	\$ 1.130.918,3	\$ 13.571.019,2
30,0	\$ 1.187.464,2	\$ 14.249.570,2

Nota. En la tabla se presenta los ingresos anuales por un tiempo estimado de 10 años con incremento de 5% sobre el producto de venta.

5.1 Costos de mano de obra

Los costos de mano de obra están directamente relacionados con el número de personas involucradas dentro del desarrollo del proceso. El valor de mano de obra se establece por medio de un salario mínimo mensual vigente en Colombia para el año 2021. Con respecto al número de personas necesarias para la operación del proyecto se establece 2 personas las cuales tendrán un contrato de prestación de servicios. Donde un operario debe realizar labores con una duración de dos horas por 24 días laborados el cumplirá un máximo de 48 horas ya que el proceso no debe estar en constante rotación y el otro es un ingeniero con conocimientos en procesos de producción el cual se debe comprometer a realizar una revisión semanal del proceso el cual contara con un tiempo estimado de 2 horas a la semana.

Tabla 15.*Costos de mano de obra en la producción*

Concepto	Costo mano de obra operario		Costo mano de obra Ingeniero	
	Valor (COP)/mes	Costo anual	Valor (COP)/mes	Costo anual
Sueldo	\$ 121.137	\$ 1.453.642	\$ 94.707	\$ 1.136.486
Auxilio de transporte	-	-	\$ -	\$ -
Prima	-	-	\$ -	\$ -
Vacaciones	-	-	\$ -	\$ -
Cesantías	-	-	\$ -	\$ -
Intereses de cesantías	-	-	\$ -	\$ -
Total	\$ 121.137	\$ 1.453.642	\$ 94.707	\$ 1.136.486

Nota. En la tabla se representa el costo de mano de obra para cada uno de las personas propuestas para el manejo del proceso de producción de abono orgánico.

5.2 Costos equipos y materiales

Los costos relacionados con la inversión de equipos y materiales adicionales son los de mayor importancia y son determinados de acuerdo a la cantidad necesaria de cada equipo. La descripción de los equipos se encuentra en el capítulo 4 conjunto a su ficha técnica dentro del escalamiento del proceso.

Tabla 16.*Costos de inversión para el proyecto*

Inversión			
Equipo	costo unitario (COP)	Cantidad	Valor Total
Motor de 3,7 hp	\$ 793.100	1	\$ 793.100
Reactor	\$ 9.313.150	1	\$ 9.313.150
secador giratorio	\$ 3.811.500	1	\$ 3.811.500
Trituradora	\$ 1.792.753	1	\$ 1.792.753
Tamizador	\$ 3.657.500	1	\$ 3.657.500
Inversión Total	\$		\$ 19.368.003

Nota. En la tabla se presentan los costos por unidad de operación y total de la inversión para el proyecto de producción de compostaje.

5.3 Costos directos de producción

Los costos directos en un proceso de producción son aquellos asignados a la inversión de materias primas para que este se lleve a cabo. Sin embargo, como las materias primas utilizadas dentro de este proceso son residuos obtenidos dentro de la empresa no se tienen en cuenta. Por otro lado, si se toman reporte de costos de energía eléctrica y agua por consumo básico si llega a ser necesario dentro del proceso.

Tabla 17.

Costos directos de producción

Costos directos de producción					
Concepto	Unidad	Valor unidad (COP)	Total/mes (COP)	Costo anual (COP)	
Lodo	kg	-	-		
Césped	kg	-	-		
Energía Eléctrica	kW/h	\$ 723	\$ 21.678	\$ 260.140	
Empaque	m	\$ 3.200	\$ 96.000	\$ 1.152.000	
Total			\$ 117.678	\$ 1.412.140	

Nota. En la tabla se presentan los costos directos dentro del proceso, donde se determina el valor de cada uno de los elementos implicados en el producto

5.4 Costos indirectos de producción

Los costos indirectos de producción están asociados a los implementos y servicios sobre la marcha del proceso, pero a su vez no intervienen con la producción directamente, por esta razón se consideran costos fijos. Cada una de las maquinas requeridas para el proceso requiere energía eléctrica por ende no es necesario la red de gas natural.

Tabla 18.

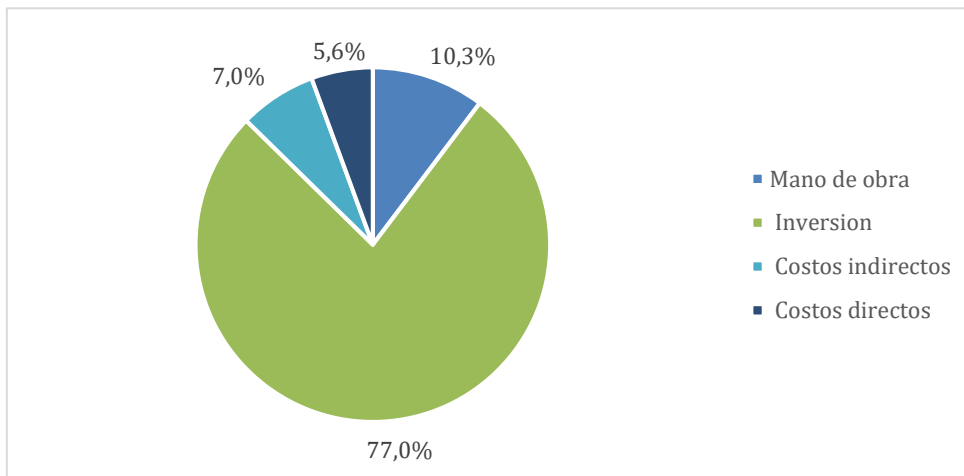
Promedio costos indirectos de producción

Costos Indirectos de producción				
Concepto	Valor unidad (COP)	Total/mes (COP)	Costo anual (COP)	
Agua	\$ 3.027	\$ 22.703	\$ 272.430	
Energía Eléctrica	\$ 723	\$ 87.573	\$ 1.050.879	
Elementos de seguridad	\$ 224.000	\$ 224.000	\$ 448.000	
Total		\$ 311.573	\$ 1.498.879	

Nota. En la tabla se muestran los factores indirectos para la empresa durante el proceso de compostaje.

Figura 33.

Distribución de costos del proyecto en el año



Nota. En la gráfica se ve la distribución de costos sobre el proyecto a lo largo del año

Los costos del proyecto en total son de \$ 25.141.580 COP, de los cuales el mayor porcentaje hacer referencia a la mano de obra utilizada durante el proceso, de acuerdo a la figura 33 este costo abarca el 77.0% del costo total, mientras que los costos directos de producción son los de menor medida con un valor de 5.6% ya que la materia prima a utilizar no se requiere compra debido a que estas son residuos obtenidos en la PTAR.

5.5 Evaluación costo/ beneficio

El método costo/beneficio se basa en la relación de los beneficios a los costos asociados con un proyecto en específico. Un proyecto es atractivo económicamente cuando los beneficios derivados desde su implementación exceden los costos asociados. Por ende, el primer paso sobre este análisis es presentar los elementos que constituye beneficios y cuáles son los costos. Por lo general, los beneficios son ventajas que se reflejan en términos de dinero; cuando el proyecto a considerar comprende más desventajas que ventajas para el propietario, esto se conoce como desbeneficios [49].

Una vez especificado lo anterior, en conjunto con los costos de producción ya calculados conjunto a la inversión sobre el proyecto. Se aclara que los costos son estimativos por ende no se representa un valor monetario exacto, sin embargo, la estimación ayuda a visualizar la viabilidad del proyecto.

Tabla 19.

Costos totales de implementación y operación de un modelo piloto de compostaje en el municipio de Funza Cundinamarca

Costos de inversión		
Costos de maquinaria		
Motor de 3,7 hp	\$	1.586.200
Reactor	\$	8.520.050
secador giratorio	\$	3.811.500
Trituradora	\$	1.792.753
Tamizador	\$	3.657.500
Total	\$	19.368.003
Costos de operación		
Mano de obra	\$	215.844
Costos directos	\$	117.678
Costos indirectos	\$	311.573
Total	\$	645.096
Costo operación al año	\$	5.773.577
total, de costos	\$	25.141.580

Nota. En la tabla se hace una recopilación de los gastos generados, especificados anteriormente.

Para realizar el cálculo sobre la relación C/B, es importante representar los valores futuros de ingresos y costos. Para el cálculo de valor futuro de los posibles ingresos se aplica la siguiente formula:

$$VF = VP(i + 1)$$

Donde:

VP= Valor presente

VF= Valor futuro

I= tasa de interés

Teniendo en cuenta que no se cuenta con una tasa de interés se toma la decisión de realizar un promedio sobre el IPC de los últimos 6 años (2015-6.77%; 2016-5.75%; 2017- 4.09%; 2018- 3.18%; 2019- 3.8% y 2020-1.61%) [50], generando así un IPC de 4.2%. Es importante resaltar que este promedio se realiza para determinar ingresos y costos por año y dichos valores se representaran el valor presente del dinero.

Tabla 20.

Promedio de IPC

AÑO	IPC
2015	6,8%
2016	5,8%
2017	4,1%
2018	3,2%
2019	3,8%
2020	1,6%
PROMEDIO	4,2%

Nota. En la tabla se presenta el incremento de IPC año a año durante los últimos 6 años tomado de: DANE, "Histórico del IPC Colombia," 2020. [Online]. Available: https://www.consultorcontable.com/datos-hist%C3%B3ricos/ipc-historico/#google_vignette. [Accessed: 2021]

Tabla 21.*Costos de operación anual planta piloto de compostaje*

AÑO	COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN	
2021	\$	5.773.577
2022	\$	6.016.067
2023	\$	6.268.742
2024	\$	6.532.029
2025	\$	6.806.375
2026	\$	7.092.242
2027	\$	7.390.116
2028	\$	7.700.501
2029	\$	8.023.922
2030	\$	8.360.927
2031	\$	8.712.086

Nota. En la tabla se presenta el total de costos anuales de operación

Tabla 22.*Ingresos por ventas de abono orgánico***INGRESOS POR VENTA DE COMPOSTAJE**

Bultos mensuales de compostaje	Ventas del 100% de bultos		Ventas al año
30,0	\$	729.000,0	\$ 8.748.000,0
30,0	\$	765.450,0	\$ 9.185.400,0
30,0	\$	803.722,5	\$ 9.644.670,0
30,0	\$	843.908,6	\$ 10.126.903,5
30,0	\$	886.104,1	\$ 10.633.248,7
30,0	\$	930.409,3	\$ 11.164.911,1
30,0	\$	976.929,7	\$ 11.723.156,7
30,0	\$	1.025.776,2	\$ 12.309.314,5
30,0	\$	1.077.065,0	\$ 12.924.780,2
30,0	\$	1.130.918,3	\$ 13.571.019,2
30,0	\$	1.187.464,2	\$ 14.249.570,2

Nota. En la tabla especifica la cantidad de bolsas de 10 kg producidas al año por parte del proceso, ventas al mes al 100% y ventas al año.

Una vez traídos los ingresos y costos a valor presente, se procede a realizar el análisis de factibilidad.

Tabla 23.

Flujo de caja proceso compostaje

Año	Inversión	Ingresos	Costos totales	Relación ingresos- costos
2021	\$ 19.368.003			
2022		\$ 8.748.000	\$ 5.773.577	\$ 2.974.423
2023		\$ 9.185.400	\$ 6.016.067	\$ 3.169.333
2024		\$ 9.644.670	\$ 6.268.742	\$ 3.375.928
2025		\$ 10.126.904	\$ 6.532.029	\$ 3.594.874
2026		\$ 10.633.249	\$ 6.806.375	\$ 3.826.874
2027		\$ 11.164.911	\$ 7.092.242	\$ 4.072.669
2028		\$ 11.723.157	\$ 7.390.116	\$ 4.333.040
2029		\$ 12.309.314	\$ 7.700.501	\$ 4.608.813
2030		\$ 12.924.780	\$ 8.023.922	\$ 4.900.858
2031		\$ 13.571.019	\$ 8.360.927	\$ 5.210.092

Nota. En la tabla se relacionan los ingresos por ventas de producto con respecto a los gastos mensuales de operación incorporando inicialmente la inversión todo lo anterior sobre una tonelada de lodo residual como materia prima.

Para encontrar en la relación costo beneficio es importante calcular los ingresos y egresos netos del proceso. Por ende, se utiliza una tasa de descuento (TIO) del 14% la cual fue empleada en un estudio similar [49].

Tabla 24.

Costo beneficio del proyecto

Suma de ingresos	\$ 54.491.851,68
Suma de egresos	\$ 19.557.711,15
Costos- Inversión	\$ 38.925.713,65
C/B	1,4

Nota. En la tabla se presenta el flujo neto de ingresos, egresos más la inversión y la relación C/B

El análisis sobre el valor obtenido por la relación C/B permite conocer si el proyecto presentado es rentable. Si $C/B > 1$ el proyecto es financieramente rentable y si por el contrario $C/B \leq 0$ es posible que no se genere un beneficio por ende no es rentable y no es conveniente desarrollarlo[51]. Partiendo de lo anterior se obtiene un valor de $C/B = 1.4$ lo cual indica que el proyecto de compostaje es viable y genera beneficios. Posteriormente se contrasta con la relación costo/beneficio de la disposición actual.

Para el costo de disposición actual se debita un aproximado de \$80.000 COP por m^3 de lodo residual a tratar el cual equivale a una tonelada del mismo, generando costos anuales de \$960.000 COP.

Tabla 25.

Flujo de caja disposición actual

Año	Ingresos	Costos totales	Relación ingresos-costos
2021	\$ - \$	960.000	-\$ 960.000
2022	\$ - \$	1.000.320	-\$ 1.000.320
2023	\$ - \$	1.042.333	-\$ 1.042.333
2024	\$ - \$	1.086.111	-\$ 1.086.111
2025	\$ - \$	1.131.728	-\$ 1.131.728
2026	\$ - \$	1.179.261	-\$ 1.179.261
2027	\$ - \$	1.228.790	-\$ 1.228.790
2028	\$ - \$	1.280.399	-\$ 1.280.399
2029	\$ - \$	1.334.176	-\$ 1.334.176
2030	\$ - \$	1.390.211	-\$ 1.390.211

Nota. En la tabla se relación el costo mensual de disposición sobre una tonelada de lodo residual obtenido en la planta

Al igual que para la relación costo/ beneficio del proceso de compostaje se debe utilizar la misma tasa de descuento (TIO) del 14%.

Tabla 26.

Costo beneficio de la disposición actual

Suma de ingresos	\$ 0,00
Suma de egresos	\$ 5.808.665,00
Costos- Inversión	\$ 5.808.665,00
C/B	0

Nota. En la tabla se presenta el flujo neto de los costos teniendo en cuenta que no existe ingresos y por consiguiente tampoco inversión.

Partiendo de los parámetros explicados anteriormente el sistema de disposición actual expresa un $C/B = 0$, esto representa que el sistema no es rentable para la empresa ya que no se genera ningún beneficio sobre este, convirtiéndose en un gasto fijo mensual.

Adicionalmente se realiza la estimación del VPN como se evidencia en la ecuación 11, el cual es un indicador de rentabilidad adicional, que proporciona la evaluación del proyecto con respecto al flujo de caja obtenido en las utilidades.

Ecuación 11. Valor presente neto (VPN)

$$VPN = -I + \frac{P1}{(1 + TIR)^1} + \frac{P2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{Pn}{(1 + TIR)^n}$$

Donde:

VPN: Valor presente neto

I: Inversión inicial

Pn= Flujo neto anual

TIO: Tasa de descuento

Este indicador se justifica de acuerdo a su resultado; si el $VPN > 0$ es viable, si el $VPN = 0$ no se pierde, pero tampoco se gana dinero y si el $VPN < 0$ el proyecto no es factible.

Con un valor presente neto (VPN) de \$ 189.708 la conclusión es que la implementación de la planta piloto es viable sobre el residuo a tratar. Por otro lado, realizando la inversión se pueden obtener ganancias desde el primer año de \$ 2.974.423 COP, representando ingresos mensuales de \$ 729.000 COP, que si bien no representa un valor alto puede ser un producto con gran valor agregado dentro de las estrategias de la empresa, por otro lado, el VPN de la disposición actual es de -\$ 5.926.559 lo cual indica inicialmente que no es viable porque solo es un gasto que no genera

ningún beneficio porque es dispuesto por un tercero. Aunque independientemente de la rentabilidad obtenida se debe resaltar que la planta piloto está diseñada para visualizar el comportamiento y funcionamiento del proceso de producción.

El proyecto en general cuenta con aspectos sociales y ambientales altamente viables ya que, al ser una empresa de carácter público, busca en conjunto con la administración municipal un crecimiento sostenible para la ciudadanía. Teniendo en cuenta lo anterior Funza es un municipio de primera categoría lo cual indica su capacidad de gestión administrativa teniendo en cuenta la población e ingresos corrientes de libre destinación [52]. Por lo cual el bioproducto generado convertirse es un precursor de ayuda y sostenibilidad para los campesinos, como estrategia en el mercado y como reductor de efectos ambientales dentro de la zona, haciendo que la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo del municipio promueva fundamentos ecológicos como la evolución de cadenas productivas generando un crecimiento económico fomentando la utilización continua de recursos naturales o desechos obtenidos.

La escala piloto no abarca el 100% de la producción mensual de lodo residual por eso es importante considerar la optimización del proceso a escala industrial teniendo en cuenta que a escala piloto el costo/beneficio es viable, donde podría llegar a alcanzar mayores ganancias económicas, sociales y ambientales.

6. CONCLUSIONES

El propósito del presente estudio fue el diseño de un proceso para la producción de abono orgánico a partir del lodo residual obtenido en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Funza, Cundinamarca.

Se realizó el diagnóstico de los lodos residuales en el centro de biosistemas de la universidad Jorge Tadeo lozano, donde se caracterizó la muestra presentada, obteniendo así una relación C/N de 5,48, una humedad de 62,13 y un pH de 6.8. Estas características obtenidas del lodo son similares a las propuestas por [14]-[17], donde se realiza procesos de compostaje aerobio a partir de lodos residuales, adicionalmente por medio de revisión bibliográfica se determinaron las propiedades fisicoquímicas del agente de carga escogido (césped) y se estimaron las cantidades máxicas y volumétricas producida de ambos residuos por la PTAR.

Se selecciono un proceso de compostaje aerobio por medio de una matriz de selección donde se evaluaron diferentes alternativas bajo criterios como: tiempo, eficiencia, área disponible y costos. El sistema de reactor horizontal con volteo obtuvo el mayor puntaje (3.8) el cual se adecua a las necesidades planteadas por parte de la empresa, autores como [12], [15] aconseja realizar este proceso por medio de este sistema debido a que el compostaje puede darse entre 15 y 20 días sin necesitar grandes extensiones de área el sistema de pilas, adicionalmente el proceso por reactor horizontal normalmente es el que mayores costos puede llegar a presentar.

Una vez establecido el sistema de compostaje, se realizaron 3 prototipos escala laboratorio los cuales permitieron el desarrollo experimental del proceso, así mismo se realizó el seguimiento de las variables temperatura, pH, humedad y cenizas. Para la carga de los reactores se realizó un balance de materia con respecto al lodo y agente de carga cumpliendo con los parámetros establecidos para el desarrollo del compostaje como relación C/N y humedad. El reactor 1 no alcanzo a cumplir la etapa termófila, sin embargo, los 3 reactores tienen el mismo comportamiento obteniendo un coeficiente promedio de 87% de biodegradación a lo largo del compostaje. El producto obtenido fue homogenizado a partir de los 3 reactores, el cual cumple con los parámetros fisicoquímicos exigidos por la NTC-5167 para abonos orgánicos generando una factibilidad

técnica, salvo del parámetro de humedad el cual requiere de acondicionamiento al haber presentado altos niveles de humedad (48,98%).

Se evidencio a partir de balance de materia establecido la perdida de material por volatilización, donde los compuestos emitidos son precursores del calentamiento global, sin embargo, al ser un compostaje aerobio contó con menor incidencia en el desprendimiento de estos gases en comparación con sistemas anaeróbicos como rellenos por compactación.

Luego se escaló el proceso a escala piloto donde por medio del método de [45], el cual aplico la similaridad geométrica y cinética. Este se fundamentó a partir de la tasa de flujo de calor generada por el volumen compostado y la tasa de flujo de calor disipada en el área de la relación geométrica empleada. La unidad que alcanzo la condición térmica que simula el mismo comportamiento contó con dimensiones de 0.6 m de radio interno, con 0.2m de espesor y 3.5 m de longitud con un volumen de 4.23 m³ de capacidad; el cual se ajusta a la necesidad de 4.20 m³ reduciendo la capacidad aproximada de gases estimados.

Para finalizar se realizó un análisis de los costos necesarios para el desarrollo del proceso a una escala piloto. Donde los costos necesarios para el primer año son de \$ 25.141.580 COP, de los cuales \$ 19.368.003 COP correspondieron a la inversión de equipos. Los costos directos de producción son bajos teniendo en cuenta que la materia prima a utilizar son residuos producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, se realizó un estudio financiero por medio de dos indicadores como la relación Costo/Beneficio y el valor presente neto (VPN) tanto para el proceso de producción como el de disposición actual, por lo tanto, se realizó el flujo de caja para cada una de la operaciones demostrando ingresos, y costos mensuales proyectados a un plazo de 10 años donde se encontraron valores de costo/beneficio de \$ 189.708 y -\$5.926.529 para el proceso de compostaje y la disposición actual respectivamente. Para los anteriores valores solo se debe especificar que el costo de disposición actual a largo plazo seguirá siendo un gasto en lugar de ser dispuesto para un beneficio económico o social.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Belzona. Inc, “Tratamiento de Aguas Residuales,” 2010 [Online]. Available: <https://www.belzona.com/es/industries/wastewater.aspx>. [Accessed: Ago. 10, 2021]
- [2] Degremont, “Water treatment handbook” [Online]. Available: <https://n9.cl/vkg04> [Accessed: Ago.13, 2021]
- [3] B. Amador, “Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones,” vol. 46, pp. 1–10, 2014 [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>. [Accessed: Ago. 13, 2021]
- [4] Por Fibras y Normas de Colombia, “Lodos Activados: Tratamiento Y Métodos.” a.f, [Online]. Available: <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/fangos-activados-tratamiento-elementos/>. [Accessed: Sep. 4, 2021]
- [5] P. Mariel, “Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento,” Universidad de las américas puebla, 2005 [Online]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/capitulo4.pdf. [Accessed: Sep. 5, 2021]
- [6] D. Roger, “Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y san Martín de los llanos en el departamento del Meta,” Pontificia universidad javeriana, pp 27-67, 2013 [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10554/13496> [Accessed: Sep. 4, 2021]
- [7] Decreto 1287 [Juriscol – decreto obligatorio], “criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales” 2014 [Online]. Available: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>. [Accessed: Sep. 8, 2021]

- [8] P. Alberto, "Manual de compostaje del agricultor," Santiago de Chile, Pp. 3-112, 2013 [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>. [Accessed: Sep. 1, 2021]
- [9] Y. Marino et al., "manual de compostaje." Madrid, España, 2013 [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGI%20NAS%201-24_tcm30-185556.pdf. [Accessed: Ago. 13,2021]
- [10] S. Arce and E. P. Takeshi, "Microbial activity in the aerobic composting process of organic solid waste," vol. 3, no. 2, 2014. [Accessed: Ago. 23,2021]
- [11] E. Jarre, "Planta de Compostaje de RSU y Residuos Cítricos Industriales," Universidad de Sevilla, 2015 [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70677/>. [Accessed: Sep. 11, 2021]
- [12] M. Bertodolti, W. Bidlingmaier, and E. Stentiford, "waste management series 8 compost science and technology". Elsevier, 2007. [Accessed: Sep. 11, 2021]
- [13] NTC-ISO 5667-13 "guia de muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas" Pp. 7-22, 22-Jul-1998. [Accessed: Sep. 14, 2021].
- [14] R. Yañez, J. L. Alonso, and M. J. Díaz, "Influence of bulking agent on sewage sludge composting process," vol. 100, no. 23, pp. 5827–5833, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.073>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409006439>. [Accessed: Sep. 22, 2021]
- [15] A Nayak and A. Kalamdhad, "Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis," vol. 4, no. 4, pp. 249–259, Dec. 2015, Doi: 10.1007/s40093-015-0104-4. [Online]. Available: <https://search.proquest.com/docview/1747538298>. [Accessed: Sep, 23. 2021]

- [16] L. Moretti, I. Bertoncini, and C. Abreu-Junior, "Composting sewage sludge with green waste from tree pruning," vol. 72, no. 5, pp. 432–439, oct. 2015, Doi: 10.1590/0103-9016-2014-0341. [Online]. Available: <https://n9.cl/v5txa> [Accessed: Sep. 23, 2021]
- [17] S. Ucaroglu and B. Ozbek, "Compostability of Treatment Sludge and Cattle Manure," vol. 25, no. 5, pp. 1592–1599, Mar. 2021, Doi: 10.1007/s12205-021-1674-5. [Online]. Available: <https://n9.cl/8qpyz>. [Accessed: Sep. 15, 2021]
- [18] M. Abdul Rahman *et al.*, "Inventory and composting of yard waste in Serdang, Selangor, Malaysia," vol. 6, no. 7, p. e04486, Jul. 2020, Doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04486. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04486>. [Accessed: Sep. 30, 2021]
- [19] S. Vigneswaran, J. Kandasamy, and M Johir, "Sustainable Operation of Composting in Solid Waste Management," vol. 35, pp. 408–415, 2016, Doi: 10.1016/j.proenv.2016.07.022. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.022>. [Accessed: oct. 1, 2021]
- [20] I. Mason and M. Milke, "Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems," vol. 25, no. 5, pp. 481–500, 2005. a.f [Accessed: oct. 2, 2021]
- [21] F. N. Alkoaik, "Integrating aeration and rotation processes to accelerate composting of agricultural residues," vol. 14, no. 7, p. e0220343, 2019. [Accessed: Sep. 28, 2021]
- [22] C. Wang, L. Pang, X. Liu, Y. Wang, K. Zhou, and F. Luo, "Using thermal balance model to determine optimal reactor volume and insulation material needed in a laboratory-scale composting reactor," vol. 206, 2016, Doi: 10.1016/j.biortech.2016.01.097. [Accessed: Sep. 30, 2021]
- [23] K. Azim, "Composting parameters and compost quality: a literature review," vol. 8, pp. 1–18, 2018, Doi: 10.1007/s13165-017-0180-z. [Accessed: Oct.. 3, 2021]

- [24] S. Hemidat, M. Jaar, A. Nassour, and M. Nelles, "Monitoring of Composting Process Parameters: A Case Study in Jordan," vol. 9, 2018, Doi: 10.1007/s12649-018-0197-x. [Accessed: Oct.. 3, 2021].
- [25] C. Ghinea and A. Leahu, "Monitoring of Fruit and Vegetable Waste Composting Process: Relationship between Microorganisms and Physico-Chemical Parameters," vol. 8, p. 302, 2020, Doi: 10.3390/pr8030302. [Accessed: Oct.. 5, 2021].
- [26] NTC 1886 [Icontec] "Ingeniería civil y arquitectura. Suelos. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica", 1994 [Online]. Available: https://books.google.com.co/books?id=_23djgEACAAJ. [Accessed: Oct.. 1, 2021]
- [27] Z. Galea, *et al* "Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues," vol. 147, pp. 132–139, Jan. 2015, Doi: S0301-4797(14)00455-1 [pii]. [Accessed: Oct.. 15, 2021]
- [28] NTC 1495 [Icontec] "método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de humedad en suelos, rocas con base en la masa" Apr-2013. [Accessed: Oct.. 16, 2021]
- [29] T. Stuart. *et al*, "Cornell composting." a.f [Online]. Available: <http://compost.css.cornell.edu/>. [Accessed: Oct. 17, 2021]
- [30] F. C. Michel, J. Quensen, and C. A. Reddy, "Bioremediation of a PCB-contaminated soil via composting," vol. 9, no. 4, pp. 274–284, 2001. [Accessed: Oct. 17, 2021]
- [31] Icia, "El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje." a.f [Accessed: Oct. 17, 2021]
- [32] NTC 5167, [Icontec] "Productos Para La Industria Agrícola. Productos Orgánicos Usados Como Abonos O Fertilizantes Y Enmiendas O Acondicionadores De Suelo." 2011. [Accessed: Oct. 20, 2021]

- [33] F. Escobar, *et al.* “Evaluación del proceso de compostaje con diferentes tipos de mezclas basadas en la relación C/N y la adición de preparados biodinámicos en la Granja Modelo Pairumani,” vol. 5, no. 3, pp. 390–410, 2012. [Accessed: Oct. 26, 2021]
- [34] M. Jain, M. Daga, and A. Kalamdhad, “Composting physics: A degradation process-determining tool for industrial sludge,” vol. 116, pp. 14–20, 2018, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.015>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857418300533> [Accessed: Oct. 26, 2021]
- [35] E. Pagans, X. Font, and A. Sánchez, “Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: abatement by biofiltration,” vol. 131, no. 1–3, pp. 179–186, Apr. 2006, doi: S0304-3894(05)00551-0 [pii]. [Accessed: Oct. 29, 2021]
- [36] Smart educación, “Ambientum,” 2021. [Online]. Available: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/olores_en_la_fermentacion.asp. [Accessed: Oct, 21. 2021]
- [37] M. Jesús *et al.*, “Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje.” [Accessed: Oct, 21. 2021] .
- [38] F. Michel, J. Quensen, and C. A. Reddy, “Bioremediation of a PCB-contaminated soil via composting,” vol. 9, no. 4, pp. 274–284, 2001. [Accessed: Oct. 27, 2021]
- [39] K. Dhamodharan, V. Varma, C. Veluchamy, A. Pugazhendhi, and K. Rajendran, “Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives,” vol. 695, p. 133725, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133725. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133725> [Accessed: Oct. 31, 2021]

- [40] EPA, “Comprensión de los potenciales de calentamiento global,” 2021. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. [Accessed: Oct. 18, 2021]
- [41] G. Tortosa, “Emisión de gases de efecto invernadero durante el compostaje de alperujo,” 2013. [Online]. Available: <http://www.compostandociencia.com/2013/03/emision-de-gases-de-efecto-invernadero-html/>. [Accessed: Oct 31. 2021]
- [42] J. Herrera *et al* “Emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterios derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica,” vol. 52, no. 1, pp. 94–109, Dec. 2017, doi: 10.15359/rca.52-1.5. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=6231080> [Accessed: Nov. 4, 2021]
- [43] V. Velasco *et al.*, “N H 3 Emisión De Amoniaco Durante Los Procesos De Compostaje Y Vermicompostaje: Aspectos Prácticos Y Aplicados Ammonia Emission During Composting And Vermicomposting Processes: Practical And Applied Aspects,” vol. 9, no. 8. p. 45, 2016. [Accessed: Nov. 4, 2021]
- [44] M. Huamán, “Concentración de nitrógeno, fosforo, potasio y calcio en el compost producido a partir de residuos sólidos orgánicos de mercados populares y residencias de Huaraz-Ancash,” vol. 12, no. 2, pp. 264–273, Dec. 2019, doi: 10.32911/as.2019.v12.n2.647. [Online]. Available: <https://n9.cl/64wnm> [Accessed: Nov. 6, 2021]
- [45] E. Behrentz, “Palabras de Instalación Foro ‘El rol de la ingeniería y de la investigación en ingeniería en el proceso de licenciamiento ambiental,’” no. 43, Nov. 2015, Doi: 10.16924/riua.v0i43.894. [Accessed: Nov. 9, 2021]
- [46] J. Hogan, F. Miller, and M. Finstein, “Physical modeling of the composting ecosystem,” vol. 55, no. 5, pp. 1082–1092, May 1989, Doi: 10.1128/AEM.55.5.1082-1092.1989. [Online].

Available: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID#61;US8926781>
[Accessed: Nov. 9, 2021]

[47] Composting, “The XACT BioReactor ,” 2020. [Online]. Available: <https://xactsystemscomposting.com/products/>. [Accessed: Nov. 10, 2021]

[48] Servinox, “Acero inoxidable” 2015. [Online]. Available: <http://aceroinoxidablee.com/>. [Accessed: Nov. 10, 2021]

[49] S. Rosme, “Estudio De Factibilidad De Implementación De Una Planta Municipal De Compostaje Para El Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Orgánicos En Una Cundinamarca S,” Universidad Santo Tomás, 2012. [Accessed: Nov. 13, 2021]

[50] Departamenteo Administrativo Nacional de Estadística -DANE-, “Historico del IPC colombia ,” 2020. [Online]. Available: https://www.consultorcontable.com/datos-hist%C3%B3ricos/ipc-historico/#google_vignette. [Accessed: Nov. 13, 2021]

[51] Boletín Número V, "Indicadores de rentabilidad," 2017. [Accessed: Nov. 13, 2021]

[52] CGN, “Categorización de Departamentos, distritos y municipios,” 2020. [Online]. Available: <https://www.contaduria.gov.co/categorizacion-de-departamentos-distritos-y-municipios>. [Accessed: Nov. 14,2021]

ANEXOS

ANEXO 1.

FORMATO DE ENTREGA DE RESULTADOS LABORATORIO LODO RESIDUAL



FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
CENTRO DE BIO-SISTEMAS
 Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)
 Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS

ORDEN DE TRABAJO No. 000778	FECHA SOLICITUD : 10-ago-21	FECHA IMPRESIÓN : 25-ago-21
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

<p><i>Cliente</i></p> <p>Nombre: AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES Dirección: CR 2 25-59 Municipio: FUNZA Teléfono: 3042154208 Fax: E-Mail: camilacristancho8@gmail.com</p>	<p><i>Finca</i></p> <p>Nombre: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESID Municipio: FUNZA Departamento: CUNDINAMARCA</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Solicitante:</td> <td>AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES</td> </tr> <tr> <td>Material:</td> <td>No Especificado</td> </tr> <tr> <td>Identificación:</td> <td>MUESTRA No. 1 Lodo Residual</td> </tr> </table>	Solicitante:	AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES	Material:	No Especificado	Identificación:	MUESTRA No. 1 Lodo Residual
Solicitante:	AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES						
Material:	No Especificado						
Identificación:	MUESTRA No. 1 Lodo Residual						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">No. Muestra:</td> <td>811</td> </tr> </table>		No. Muestra:	811				
No. Muestra:	811						

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	62.13			
Densidad Aparente	g*cm ⁻³	1.00			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+* kg ⁻¹	64.33	169.87		
Carbono Orgánico	%	10.37	27.39		
Materia Orgánica	%	22.51	59.44		
Cenizas	%		40.56		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	5.48	5.48		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	6.80			
Conductividad Eléctrica	dS/m	0.00			
Nitrógeno Total (N):	%	1.89	5.00		18.93
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄):	%	0.644	1.700		6.44
Nitrógeno Nítrico (NO ₃)	%	0.011	0.029		0.11
Fósforo (P):	%	0.68	1.80		6.82
Potasio (K):	%	0.12	0.32		1.23
Calcio (Ca):	%	1.02	2.70		10.22
Magnesio (Mg):	%	0.18	0.48		1.83
Azufre (S):	%	0.06	0.15		0.58
Sodio (Na):	%	0.089	0.234		0.89
Hierro (Fe):	ppm	2874.7	7591.0		2.87
Manganeso (Mn):	ppm	69.3	183.0		0.07
Cobre (Cu):	ppm	48.5	128.0		0.048
Zinc (Zn):	ppm	518.4	1369.0		0.52
Boro (B):	ppm	21.9	57.8		0.022

Metodología:
 N según Kjeldahl, P y B por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn por absorción atómica. Carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores y menores en relación peso a peso.

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.
 Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

ANEXO 2

INSTRUMENTOS DE MEDICION PARA SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES.

Figura 34. *Multiparámetro portátil 3630 IDS WTW*



Nota: El Multiparámetro portátil, es un equipo medidor multiparamétrico para determinaciones electroquímicas de pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto y Temperatura. Tomado de: O. Perú, “Equipo multiparámetro portátil 3630 IDS WTW”, 2019. [Online]. Available: <https://www.oz-peru.com/analizador-de-la-calidad-del-agua-multimetro-portatil-3630-wtw/>. [Accessed: 2021]

El equipo multiparámetro portátil, Multi 3630 IDS WTW viene con 03 sensores individuales dentro de ellos el Sensor de pH (SENTIX 940 WTW) Cuenta con un electrodo para la medición de pH IDS. Cuenta con una señal de medición a prueba de errores.

Figura 35. *Termómetro digital de punzón*



Nota. Termómetro de punzón de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ de exactitud. Tomado de: “termómetros digitales portátiles de bolsillo de punzón.” [Online]. Available: <https://n9.cl/9kva2>. [Accessed: 2021]

El termómetro de punzón marca thermco, con rango de toma de -50 a 300°C , el cual cuenta con una longitud de 12” de bulbo de acero inoxidable, con precisión de $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$.

ANEXO 3

BALANCE DE MATERIA PARA LA DETERMINACION DE LA RELACION C/N INICIAL Y LA CANTIDAD DE AGENTE DE CARGA INICIAL

Para determinar los flujos de ingreso a través de los valores obtenidos por la densidad aparente y el volumen del reactor se multiplica inicialmente por el 60% de capacidad de cada uno de los componentes.

$$m_1 = (V * \rho_1) * 0.60$$

$$m_2 = (V * \rho_2) * 0.60$$

- Balance global

$$m_1 + m_2 = m_3 \quad (1)$$

- Balances elementales

$$m_1 C_1 + m_2 C_2 = m_3 C_3 \quad (2)$$

$$m_1 N_1 + m_2 N_2 = m_3 N_3 \quad (3)$$

$$m_1 H_1 + m_2 H_2 = m_3 H_3 \quad (4)$$

- Relación C/N de la mezcla (m_3)

$$R \frac{C}{N} = \frac{C_3}{N_3} \quad (5)$$

Al dividir la ecuación (2) con la (3) se obtiene la igualdad a la relación C/N deseada teniendo en cuenta que las unidades están en base húmeda

$$R \frac{C}{N} = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2}{m_1 N_1 + m_2 N_2} \quad (6)$$

Para generar la ecuación de la humedad global aportada al sistema, se estima un modelo promedio de las humedades con participación a la entrada del proceso.

$$H = \frac{m_1 H_1 + m_2 H_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

Posteriormente para encontrar la proporción adecuada se masa de ingreso cumpliendo con la relación C/N y H global requerida para el proceso de compostaje teniendo en cuenta el alto porcentaje de humedad en el lodo, se estiman valores superiores para el agente de carga. Siendo así proporciones de 22% para el lodo y 78% para el césped para una capacidad del 60% respectivamente.

ANEXO 4

FORMATO DE ENTREGA DE RESULTADOS LABORATORIO ABONO ORGANICO



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
CENTRO DE BIO-SISTEMAS**

Autopista Norte Km10 Vía Bogotá -Briceño Chia (Cundinamarca)
Teléfono 2427030 Ext 2430/2431

**LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS
ANÁLISIS MATERIALES ORGÁNICOS**

ORDEN DE TRABAJO No. 001026	FECHA SOLICITUD : 05-oct-21	FECHA IMPRESIÓN : 20-oct-21
Ciente Nombre: AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES Dirección: CR 2 25-59 Municipio: FUNZA Teléfono: 3042154208 Fax: E-Mail: camilacristancho8@gmail.com		Finca Nombre: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESID Municipio: FUNZA Departamento: CUNDINAMARCA
Solicitante: AURA CAMILA CRISTANCHO TORRES		Material: No Especificado
No. Muestra: 1171		Identificación: MUESTRA No. 2 LODO

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	48.98			
Densidad Aparente	g ³ cm ⁻³	1.00			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg ⁻¹	110.00	215.60		
Carbono Orgánico	%	13.61	26.68		
Materia Orgánica	%	29.54	57.90		
Cenizas	%		42.10		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	6.06	6.06		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	6.10			
Nitrógeno Total (N):	%	2.24	4.40		22
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄):	%	0.612	1.200		6.12
Nitrógeno Nítrico (NO ₃):	%	0.027	0.053		0.27
Fósforo (P):	%	1.12	2.20		11.22
Potasio (K):	%	0.71	1.40		7.14
Calcio (Ca):	%	1.28	2.50		12.78
Magnesio (Mg):	%	0.28	0.55		2.82
Azufre (S):	%	0.19	0.37		1.87
Sodio (Na):	%	0.117	0.229		1.17

Metodología:

N según Kjeldahl, P por colorimetría; S por turbidimetría; K, Ca, Mg, Na por absorción atómica, carbono orgánico por calcinación. N-Mineral en KCl (1N). pH y C.E. en extracto de saturación. % de elementos mayores en relación peso a peso.

Quim. Adriana Mireya Zamudio S.

Jefe Laboratorio de Suelos y Aguas

ANEXO 5

BALANCE DE MASA DEL PROCESO ESCALA LABORATORIO

1. LODO			
M1 kg	7,9263		
C %	10,37	kg	0,82
N %	1,89	kg	0,15
H ₂ O %	62,13	kg	4,92
P %	0,68	kg	0,05
K %	0,12	kg	0,01
Ca %	1,02	kg	0,08
Mg %	0,18	kg	0,01
Na %	0,09	kg	0,01

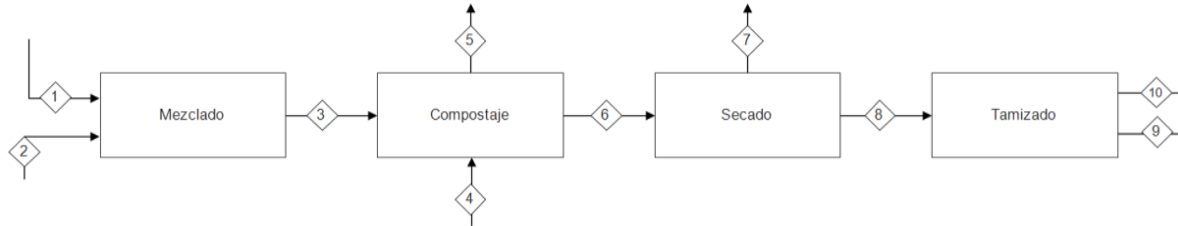
5. EMISIONES			
M5 kg	24,0770		
C %	0,92	kg	3,82
N %	0,05	kg	0,21
H ₂ O %	1,80	kg	7,47
O %	0,14	kg	0,57

6. Compost			
M6 kg	4,2727		
C %	13,83	kg	0,59
N %	1,958	kg	0,08
H ₂ O %	52,7	kg	2,25
P %	0,999	kg	0,04
K %	0,626	kg	0,03
Ca %	1,139	kg	0,05
Mg %	0,247	kg	0,01
Na %	0,102	kg	0,00

7. Agua vapor			
M7 kg	0,3560		
H %	100		0,36

8. Compost seco			
M8 kg	3,9167		
C %	15,1	kg	0,59
N %	2,14	kg	0,08
H ₂ O %	48	kg	1,88
P %	1,02	kg	0,04
K %	0,68	kg	0,03
Ca %	1,24	kg	0,05
Mg %	0,27	kg	0,01
Na %	0,11	kg	0,00

10. ABONO			
M10 kg	3,5433		
C %	13,61	kg	0,48
N %	2,24	kg	0,08
H ₂ O %	48,98	kg	1,74
P %	1,12	kg	0,04
K %	0,71	kg	0,03
Ca %	1,28	kg	0,05
Mg %	0,28	kg	0,01
Na %	0,117	kg	0,00



2. CESPED			
M2 kg	12,3552		
C %	29,06	kg	3,59
N %	1,15	kg	0,14
H ₂ O %	38,85	kg	4,80
P %	0,12	kg	0,01
K %	0,43	kg	0,05
Ca %	0,89	kg	0,11
Mg %	0,17	kg	0,02
Na %	0,06	kg	0,01

3. MEZCLA			
M3 kg	20,2815		
C %	21,76	kg	4,41
N %	1,44	kg	0,29
H ₂ O %	47,95	kg	9,72
P %	0,34	kg	0,07
K %	0,31	kg	0,06
Ca %	0,94	kg	0,19
Mg %	0,18	kg	0,04
Na %	0,07	kg	0,01

4. AIRE			
M4 kg	8,0682		
N %	78	kg	6,29
O %	21	kg	1,69

CONVENCIONES	
C	Carbono
N	Nitrogeno
H ₂ O	Agua
P	Fosforo
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio

9. CESPED REMANENTE			
M9 kg	0,3733		
C %	29,06	kg	0,11
N %	1,15	kg	0,00
H ₂ O %	38,85	kg	0,15
P %	0,12	kg	0,00
K %	0,43	kg	0,00
Ca %	0,89	kg	0,00
Mg %	0,17	kg	0,00
Na %	0,06	kg	0,00

BALANCE DE MASA DEL PROCESO ESCALA PILOTO

1. LODO			
M1 kg			769,2
C %	10,37	kg	79,77
N %	1,89	kg	14,54
H ₂ O %	62,13	kg	477,90
P %	0,68	kg	5,23
K %	0,12	kg	0,92
Ca %	1,02	kg	7,85
Mg %	0,18	kg	1,38
Na %	0,09	kg	0,68

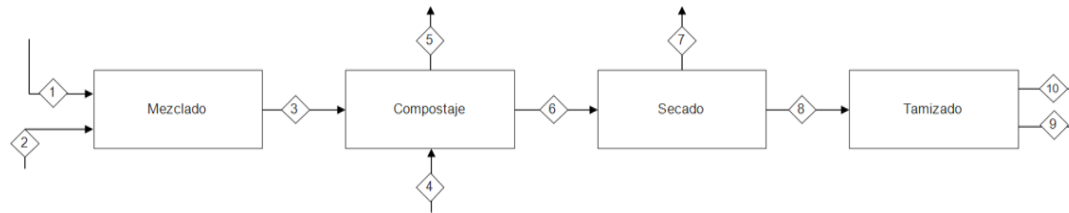
5. EMISIONES			
M5 kg			2336,0956
C %	8674,18	kg	371,31
N %	472,84	kg	20,24
H ₂ O %	16964,09	kg	726,17
O %	1279,04	kg	54,75

6. Compost			
M6 kg			413,5320
C %	13,83	kg	57,17
N %	1,96	kg	8,10
H ₂ O %	52,70	kg	217,93
P %	0,94	kg	3,88
K %	0,63	kg	2,59
Ca %	1,14	kg	4,71
Mg %	0,25	kg	1,02
Na %	0,10	kg	0,42

7. Agua vapor			
M7 kg			34,46
H %	100,00		34,46

8. Compost seco			
M8 kg			379,0764
C %	15,08	kg	57,17
N %	2,14	kg	8,10
H ₂ O %	48,01	kg	182,01
P %	1,02	kg	3,88
K %	0,68	kg	2,59
Ca %	1,24	kg	4,71
Mg %	0,27	kg	1,02
Na %	0,11	kg	0,42

10. ABONO			
M10 kg			265,3535
C %	13,61	kg	36,11
N %	2,24	kg	5,94
H ₂ O %	48,98	kg	129,97
P %	1,12	kg	2,97
K %	0,71	kg	1,88
Ca %	1,28	kg	3,40
Mg %	0,28	kg	0,74
Na %	0,117	kg	0,31



2. CESPED			
M2 kg			1200,0000
C %	29,06	kg	348,72
N %	1,15	kg	13,80
H ₂ O %	38,85	kg	466,20
P %	0,12	kg	1,41
K %	0,43	kg	5,14
Ca %	0,89	kg	10,69
Mg %	0,17	kg	2,07
Na %	0,06	kg	0,66

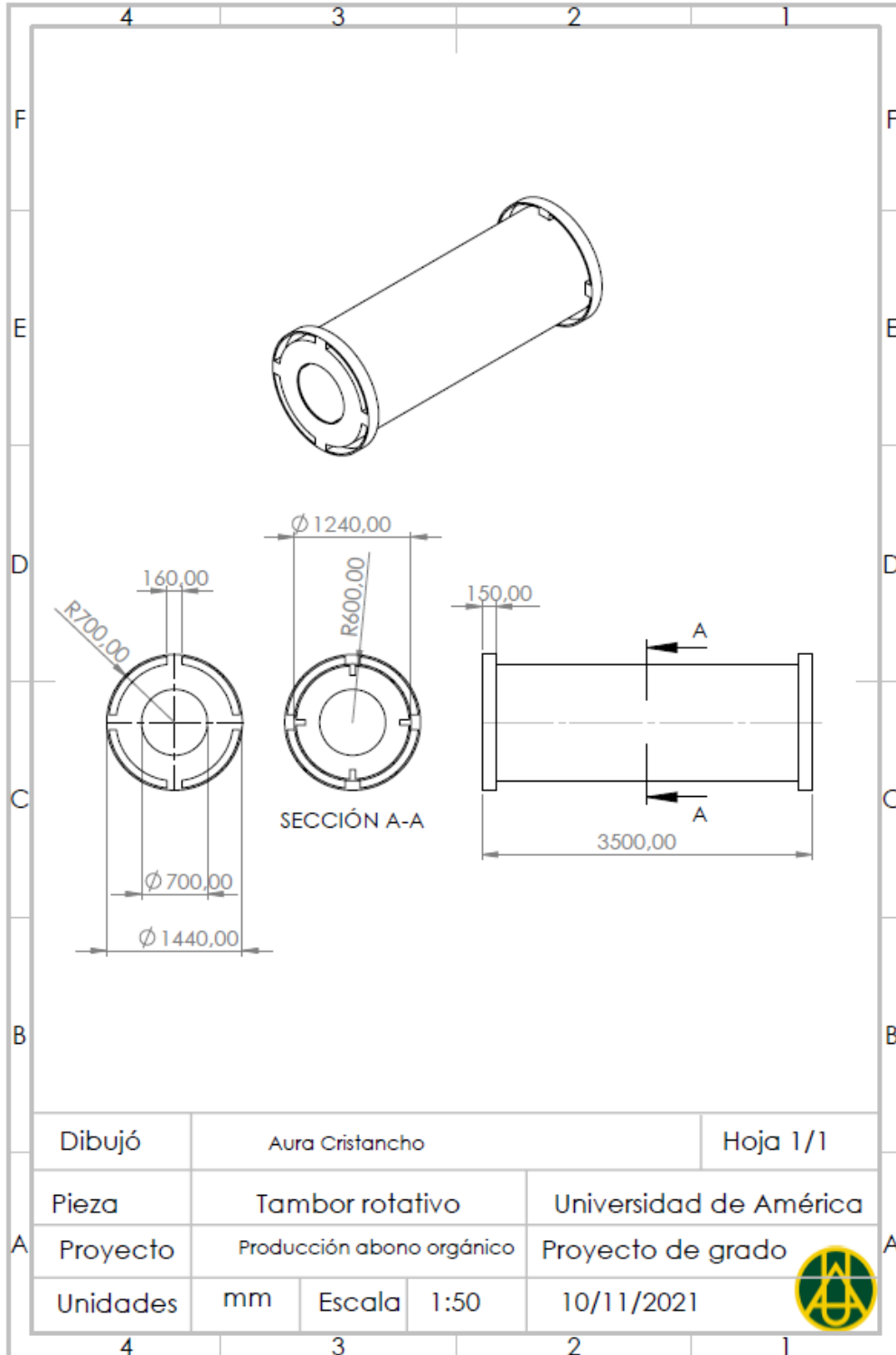
3. MEZCLA			
M3 kg			1969,2000
C %	21,76	kg	428,49
N %	1,44	kg	28,34
H ₂ O %	47,94	kg	944,10
P %	0,34	kg	6,64
K %	0,31	kg	6,06
Ca %	0,94	kg	18,54
Mg %	0,18	kg	3,46
Na %	0,07	kg	1,35

4. AIRE			
M4 kg			780,4276
N %	78	kg	608,73
O %	21	kg	163,89

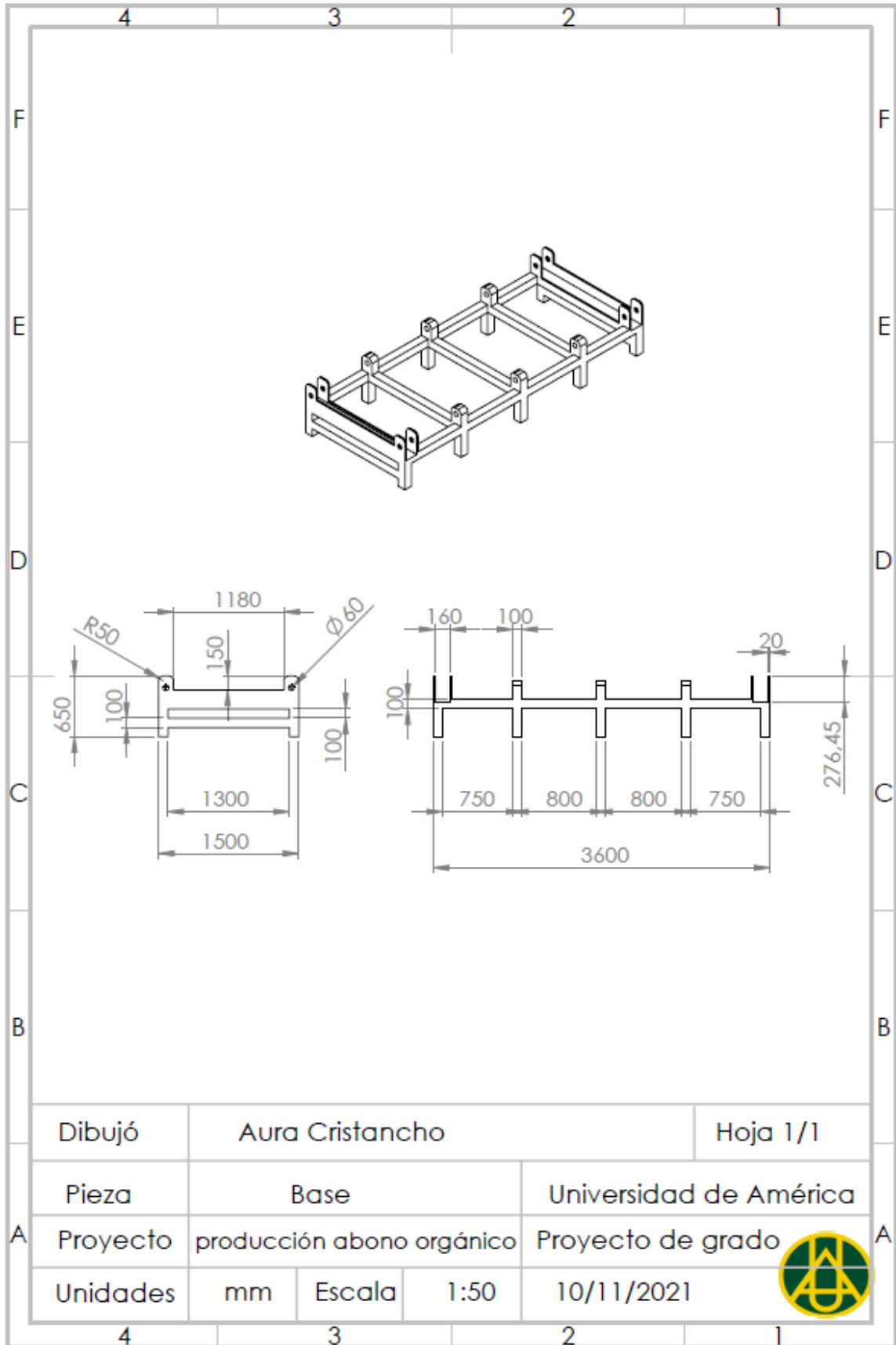
CONVENCIONES	
C	Carbono
N	Nitrogeno
H ₂ O	Agua
P	Fosforo
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio

9.CESPED REMANENTE			
M9 kg			113,7229
C %	29,06	kg	33,05
N %	1,15	kg	1,31
H ₂ O %	38,85	kg	44,18
P %	0,12	kg	0,13
K %	0,43	kg	0,49
Ca %	0,89	kg	1,01
Mg %	0,17	kg	0,20
Na %	0,06	kg	0,06

ANEXO 6
PLANOS DEL REACTOR HORIZONTAL
TAMBOR



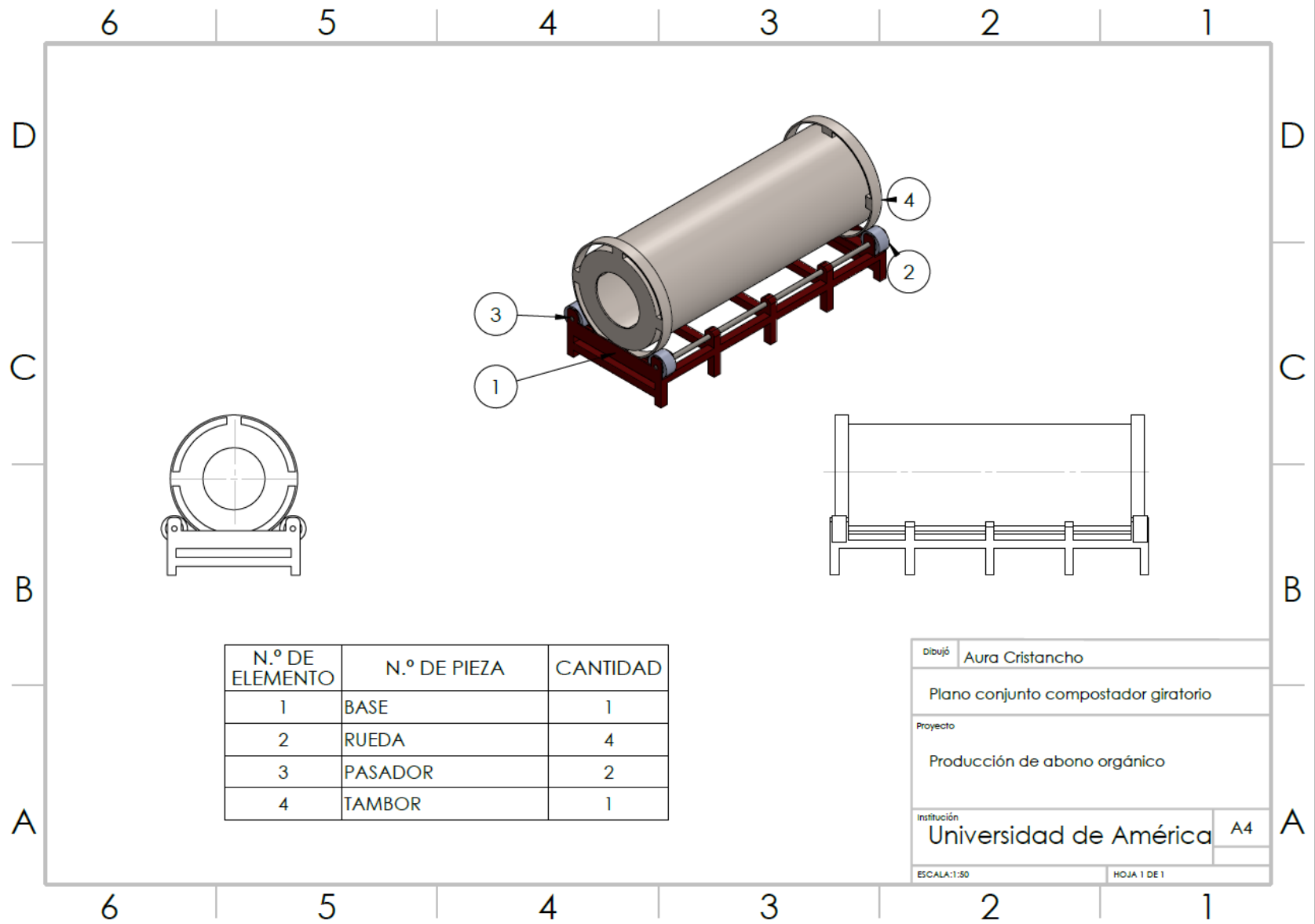
BASE



Dibujó	Aura Cristancho		Hoja 1/1
Pieza	Base	Universidad de América	
Proyecto	producción abono orgánico	Proyecto de grado	
Unidades	mm	Escala	1:50
			10/11/2021



ENSAMBLAJE



ANEXO 7

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar análisis microbiológico y de metales pesados al final del producto obtenido para poder así determinar el parámetro de patógenos dentro de la norma, adicionalmente reconocer la carga de metales pesados dentro del abono orgánico.

Se recomienda realizar una optimización al proceso de escala piloto, reduciendo el tiempo de compostaje a 15 días de recepción, ya que al ingresar gran volumen de materia prima por el efecto de la volatilización se pierde cierta cantidad de material la cual reduce el producto, por esta razón se debe realizar un equilibrio entre los residuos y el producto a obtener.

Se recomienda una optimización dentro de la infraestructura la cual podrá mejorar la rentabilidad y podrá generar mejor calidad en el abono orgánico.

Se recomienda realizar la caracterización experimental de cada uno de los residuos utilizados como agente de carga para evitar errores dentro del proceso de carga.

Se recomienda considerar otros residuos encontrados dentro del municipio, como orgánicos de comida, hojas secas, aquellos que cuenten con un alto porcentaje de carbono y así brindar la posibilidad de incorporar más lodo residual en el compostaje.

Se recomienda que al producir tan baja cantidad de producto la empresa lo pueda utilizar para labores de reforestación, cultivos, siembra de flores etc.