

**PROPUESTA PARA LA PRODUCCIÓN DE UN ABONO ORGÁNICO
PARTIENDO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL COLEGIO ROCHESTER**

ALVARO JOSÉ RODRÍGUEZ MEDINA

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2017**

**PROPUESTA PARA LA PRODUCCIÓN DE UN ABONO ORGÁNICO
PARTIENDO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL COLEGIO ROCHESTER**

ALVARO JOSÉ RODRÍGUEZ MEDINA

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

**Director
FELIPE CORREA MAHECHA
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2017**

Nota de aceptación

Jurado 1

Jurado 2

Orientador

Bogotá, D.C. Junio, 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rector de Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Postgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano de Facultad de Ingenierías

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Departamento de Ingeniería Química

Dr. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

A Dios y a la virgen por guiarme y permitirme alcanzar este logro.
A mi madre y a mi padre, que siempre me apoyaron y acompañaron en el desarrollo de todas las actividades necesarias para finalizar este proyecto. A mi tía Martha que es como mi segunda madre, y siempre se preocupó por el desarrollo de este trabajo. A mis abuelitos y tía Lilia, que desde el cielo son ángeles que siempre me cuidan y velan por mi felicidad. A toda mi familia y amigos por el aliento que ellos me proporcionan día a día para que este proyecto se lograra.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

Al Colegio Rochester de Chía por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de grado.

A mi Director, el Ingeniero Felpe Correa Mahecha por sus aportes de conocimiento y experiencia durante el desarrollo todo el proyecto.

A la asesora de grado, la Ingeniera Elizabeth Torres Gámez, y demás asesores de seminario y trabajo de grado por su contribución y apoyo intelectual.

CONTENIDO

	pág.
1. GENERALIDADES	19
1.1 MARCO TEÓRICO	19
1.1.1 Residuos Sólidos Orgánicos	19
1.1.1.1 Clasificación de Residuos Orgánicos	19
1.1.2 Abonos Orgánicos	20
1.1.2.1 Fertilizantes Orgánicos Sólidos	20
1.1.2.2 Fertilizantes Orgánico-minerales Sólidos	20
1.1.2.3 Acondicionador de Suelo Orgánico	20
1.1.3 Compostaje	20
1.1.3.1 Tipos de Compostajes	21
1.1.3.2 Sistemas de Compostaje	22
1.1.3.3 Variables de un Sistema de Compostaje	24
2. DIAGNÓSTICO	26
2.1 DESCRIPCIÓN DE PROCESO PREVIO A COMPOSTAJE DE LODOS	26
2.1.1 Proceso en planta de tratamiento de aguas residuales	27
2.1.2 Lechos de secado	28
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO	29
2.2.1 Caracterización físico-química y microbiológica.	29
2.2.2 Caracterización cuantitativa del Lodo	32
2.3 AGENTES DE CARGA	33
3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS LODOS	36
3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN PROCESO DE COMPOSTAJE	36
3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTACIÓN	40
3.2.1 Construcción de reactores	40
3.2.2 Parametrización de variables iniciales del proceso.	44
3.2.3 Protocolos de medición para las variables	46
3.2.3.1 Seguimientos variables in-situ del proceso	46
3.2.4 Seguimientos variables ex-situ del proceso	47

3.3	ACONDICIONAMIENTO LUGAR DE TRABAJO	48
3.4	ADECUACIÓN Y BALANCE DE MATERIALES DE COMPOSTAJE	49
3.5	DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	51
3.5.1	Pre-experimentación	51
3.5.2	Resultados y análisis de resultados experimentación	52
4.	ESCALAMIENTO DEL PROCESO	69
4.1	REACTOR ROTATORIO HORIZONTAL	69
4.2	UNIDADES COMPLEMENTARIAS	75
5.	ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROCESO	77
5.1	COSTOS MANO DE OBRA	77
5.2	COSTOS EQUIPOS Y MATERIALES	78
5.3	COSTOS DIRECTOS DE PRODUCCIÓN	78
5.4	COSTOS INDIRECTOS DE PRODUCCIÓN	79
5.5	FLUJO DE CAJA	80
6.	CONCLUSIONES	83
7.	RECOMENDACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA	86
	ANEXOS	92

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Métodos empleados en el Centro de Biosistemas en la caracterización del lodo.	31
Tabla 2. Principales características físico-químicas y microbiológicas del lodo.	32
Tabla 3. Caracterización del lodo y de los otros agentes de carga inicial en base húmeda.	34
Tabla 4. Cantidades másicas y volumétricas de cada materia prima producidas en un mes.	35
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los diferentes procesos de compostaje.	36
Tabla 6. Matriz de selección de proceso de compostaje a emplear en la propuesta.	39
Tabla 7. Configuraciones de control de temperatura y calor para los reactores empleados en compostaje.	40
Tabla 8. Especificaciones de reactor y soporte empleado en el experimento.	44
Tabla 9. Recolección bibliográfica para la determinación de humedad, relación C/N, y tamaño de partícula.	45
Tabla 10. Cantidades de lodo y agentes de carga empleados en la pre-experimentación y experimentación.	51
Tabla 11. Parámetros iniciales de la pre-experimentación y experimentación.	52
Tabla 12. Coeficientes de biodegradación de cada reactor con las cantidades iniciales y finales de cenizas.	59
Tabla 13. Pérdida de cenizas por materia retirada para muestreo del reactor 1.	62
Tabla 14. Cantidades de carbono al inicio, final, y emitido como CO ₂ para cada reactor, estimados para 20 años de residencia en la atmósfera.	63
Tabla 15. Estimación de cantidades de CO ₂ y CH ₄ de 20 años de residencia en la atmósfera en caso de hacer la disposición en un relleno sanitario.	64
Tabla 16. Carbono total y nitrógeno total al final del proceso de cada reactor.	65
Tabla 17. Cantidades de C y N al inicio, final del proceso, con las pérdidas respectivas.	66
Tabla 18. Temperaturas y tiempos necesarios para la eliminación de patógenos más comunes.	67
Tabla 19. Cantidades de patógenos presentes a la salida de cada reactor.	68
Tabla 20. Precios del mercado local para 10 kg de abono orgánico sólido.	77
Tabla 21. Costos anuales de mano de obra.	78
Tabla 22. Costos de inversión para el proyecto.	78
Tabla 23. Costos directos de producción.	79
Tabla 24. Costos insumos indirectos de producción.	79
Tabla 25. Balance anual proyectado para 10 años el proyecto.	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Comportamiento de respiración del CO ₂ , de consumo de O ₂ , y de temperatura en un proceso de compostaje.	21
Figura 2. Diagrama de proceso Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	26
Figura 3. Lecho de secado con dimensiones de ancho y largo para la determinación de cantidades producidas mensualmente.	33
Figura 5. Esquema del balance de materiales.	50
Figura 6. Esquema del reactor a escala piloto (medidas en metros).	74
Figura 7. Diagrama en bloques del proceso propuesto.	75
Figura 8. Ficha técnica triturador de residuos orgánicos, césped y lodo.	75
Figura 9. Ficha técnica secador material saliente del reactor.	76

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 15 cm.	53
Gráfica 2. Perfil de temperaturas de los reactores a la profundidad de 20 cm (a) y 30 cm (b).	54
Gráfica 3. Variación de pH en cada reactor durante los días del experimento.	56
Gráfica 4. Comportamiento de la humedad durante el tiempo de compostaje.	58
Gráfica 5. Comportamiento de los sólidos volátiles durante el tiempo de compostaje.	60
Gráfica 6. Variación de la materia seca en los reactores.	61
Gráfica 7. Relación de C/N al inicio y final en cada uno de los reactores.	65
Gráfica 8. Relación entre dimensiones escala piloto con respecto al diferencial de temperatura permisible a escala laboratorio.	73
Gráfica 9. Distribución de costos del proyecto en el año.	80
Gráfica 10. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 1.	104
Gráfica 11. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 2.	104
Gráfica 12. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 3.	105
Gráfica 13. Variación del pH en el tiempo de compostaje en pre-experimentación en los reactores.	105

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Lecho de secado con lodo residual al inicio (a), durante (b), y al final (c) del secado.	29
Imagen 2. Muestra de lodo enviada a la caracterización físico-química y microbiológica.	30
Imagen 3. Vista exterior (a), interior (b) del reactor si aislante, y perfil lateral del reactor con el soporte para la rotación (c).	42
Imagen 4. Reactor instalado recubierto con el material aislante (Espuma de Poliuretano).	43
Imagen 5. Lugar de trabajo del montaje experimental.	49
Imagen 6. Localización del montaje experimental en la zona de la PTAR.	49
Imagen 7. Estado inicial de la mezcla en cada uno de los reactores.	51
Imagen 8. Interior de cada reactor con presunta presencia de actinomicetes en la fase termófila.	55
Imagen 9. Interior de material final en cada uno de los reactores.	56
Imagen 10. Muestras de residuos orgánicos de casino (a) y de poda de césped (b).	93
Imagen 11. pHmetro de HANNA® Instruments referencia HI98103 con soluciones calibradoras certificadas HI7004L/C y HI7007L/C.	97
Imagen 12. Multímetro UNI-T® referencia UT200 con termocupla tipo K (a), ampliación punta termocupla (b).	98

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Procedimiento medición de la temperatura.	99
Diagrama 2. Procedimiento medición del pH.	100
Diagrama 3. Procedimiento medición de humedad.	100
Diagrama 4. Procedimiento medición de cenizas.	101

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Muestras rotuladas y empacadas de los agentes de carga del proceso de compostaje	93
ANEXO B. Formatos de entrega de resultados de laboratorios	94
ANEXO C. Instrumentos de medición para el seguimiento de las variables	97
ANEXO D. Protocolos de medición variables de proceso	99
ANEXO E. Balance de materia para la determinación de la relación de C/N inicial, humedad inicial y cantidad de agente de carga inicial	102
ANEXO F. Resultados obtenidos en la pre-experimentación	104
ANEXO G. Formatos de seguimiento de temperatura y pH	106
ANEXO H. Flujo de caja para el proyecto en un horizonte de 10 años	110

GLOSARIO

ABONO O FERTILIZANTE ORGÁNICO: producto sólido o líquido obtenido de la estabilización de residuos orgánicos, y que debe cumplir la normativa local vigente.

ACONDICIONADOR DE SUELOS ORGÁNICO: producto de origen vegetal o animal, obtenido de la estabilización y que cumple la normativa local vigente.

APROVECHAMIENTO: utilización de residuos mediante actividades tales como recuperación, transformación, y re-uso de los mismos, con el fin de generar un beneficio económico, social y de reducir los impactos ambientales y los riesgos a la salud humana asociados con la producción, manejo y disposición final de los residuos. (Decreto 2676 de 2000).

BIODEGRADACIÓN: proceso por el cual los materiales orgánicos son descompuestos por microorganismos principalmente aerobios en compuestos más simples como el CO₂, NH₃, y H₂O.

COMPOSTAJE: proceso biológico controlado por la degradación y estabilización de la materia orgánica por la intervención de los microorganismos en condiciones aerobias o anaerobias.

DIGESTOR: unidad o aparato en el cual el proceso de degradación o digestión es llevado a cabo en condiciones específicas.

DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS: proceso de aislar y confinar los residuos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares técnicamente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente. (Decreto 838 de 2005 del ministerio de ambiente , vivienda y desarrollo territorial).

ESCALAMIENTO: proceso por el cual se desarrollan criterios y reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar una operación u objeto de una escala dada a otra de mayor o menor tamaño.

RESIDUO: se refiere a materiales que no son intencionalmente producidos para el mercado, al igual que no es de uso productivo propio, de transformación o consumo por parte del generador.

RESIDUO SÓLIDO APROVECHABLE: es un material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor de uso para quien lo genere, pero que puede ser aprovechado para su reincorporación a un proceso productivo.

RESUMEN

Uno de los principales objetivos del aprovechamiento de residuos tiene que ver con la minimización del impacto ambiental y la reutilización de los mismos en favor del desarrollo de seres vivos y medio ambiente. El propósito de este proyecto es el de realizar una propuesta de un proceso de producción de un abono orgánico partiendo del lodo generado por la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del Colegio Rochester por medio de un proceso de compostaje aerobio. Para ello se llevó a cabo la caracterización físico-química, microbiológica y cuantitativa de los lodos obtenidos posteriormente al filtrado en los lechos de secado. Consecutivamente se procede a la selección del proceso de compostaje aerobio adecuado por medio de una matriz de selección, la cual evalúa los diferentes procesos con criterios como lo son el tiempo de duración, la salubridad, la eficiencia, el área disponible, y los costos. El proceso seleccionado para la propuesta con base a la matriz de selección es el de un reactor horizontal con volteo, en el cual se requirieron de agentes de carga como lo son los residuos orgánicos de casino, poda de césped, y aserrín (éste último en pre-experimentación) para poder llevar a cabo el proceso dentro de los parámetros iniciales recomendados por varios autores. Durante la experimentación se quiso evaluar el comportamiento de parámetros físico-químicos como lo son la temperatura, el pH, la humedad, las cenizas, los sólidos volátiles, y el contenido de carbono y nitrógeno, a lo largo de todo el proceso experimental. El primer experimento llevado a cabo con la mezcla lodo (12 kg), aserrín (1,537 kg) y residuos orgánicos (7,463 kg) no tuvo un buen comportamiento al entrar en una larga etapa de inactivación o latencia, en la cual no se aumentó la temperatura a niveles necesarios y el pH no tuvo incremento alguno. Por tales motivos, luego de hacer modificaciones en la aireación y la frecuencia se decide cambiar el aserrín como agente de carga, y optar por la poda de césped como agente de carga y activador, siendo así la mezcla de entrada: 10 kg de lodo, 7,631 kg de residuos orgánicos de casino, y 2,6369 kg de césped. Los resultados obtenidos en la experimentación muestran que el producto obtenido cumple con requerimientos exigidos por la normativa colombiana, con excepción de algunos parámetros microbiológicos y físicos. Por otro lado, se realiza un escalamiento del prototipo del reactor horizontal una escala piloto con la finalidad de establecer los requerimientos técnicos. Para el proyecto propuesto se realiza un análisis de costos de operación y de inversión, al igual que se realiza una evaluación del proyecto por medio de un VPN.

Palabras Clave: Compostaje, Aerobio, Escalamiento, Reactor horizontal, Lodo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el ser humano, a través de sus diversas actividades cotidianas e industriales, genera grandes cantidades de residuos; los cuales causan inconvenientes económicos y ambientales al momento de ser almacenados o dispuestos. En el Colegio Rochester la implementación y desarrollo del manejo, y control de residuos son conceptos muy importantes en la formación educativa de sus estudiantes, al igual que son pilares importantes en la finalidad de disminuir los impactos negativos sobre el ambiente y la sociedad. Por tal motivo nace este proyecto, el cual se centra en desarrollar una propuesta de un proceso de compostaje en el cual se pueda producir un abono orgánico partiendo de las propiedades presentes y aprovechables en los lodos residuales generados por parte de la PTAR del Colegio Rochester.

En la selección del proceso de compostaje, es fundamental la caracterización físico-química y microbiológica del lodo residual, al igual que la de los materiales de carga a emplear (aserrín (pre-experimentación), poda de césped, y residuos orgánicos de casino). Para la selección del proceso se evalúan las diferentes modalidades convencionales de compostaje que existen por medio de una matriz de selección, la cual evalúa el tiempo de compostaje, la salubridad, y la eficiencia de cada una de estas modalidades. El proceso de compostaje seleccionado y propuesto gira alrededor de un reactor de compostaje horizontal con aireación forzada. Éste proceso es llevado a cabo a escala laboratorio en tanques de polietileno de 60 litros, los cuales son aislados con espuma de poliuretano con el fin de preservar el calor generado durante el proceso y son aireados manualmente por medio de la rotación en bases construidas y álabes internos.

El seguimiento del proceso en la pre-experimentación y experimentación se realiza por medio de la medición de parámetros muy importantes como lo son la temperatura, el pH, la humedad, las cenizas, los sólidos volátiles, y la relación C/N. Parte de ellos son medibles en el lugar de experimentación, pero otros son realizados en laboratorios externos a la institución educativa. Con respecto al escalamiento de una unidad laboratorio a una piloto se emplea un modelo el cual se basa en la tasa de flujo generada por el volumen de material a compostar con respecto a la tasa de disipación ocurrida a través del área superficial del reactor, cumpliendo a la vez los principios de similaridad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para la producción de un abono orgánico partiendo de los lodos residuales producidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Colegio Rochester.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las principales características microbiológicas, físicas y químicas del lodo proveniente de la PTAR del Colegio Rochester.
- Seleccionar un proceso de compostaje para la producción de un abono orgánico.
- Determinar las especificaciones técnicas del proceso de producción de un abono orgánico.
- Determinar los costos del proceso de producción del abono orgánico.

1. GENERALIDADES

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Residuos Sólidos Orgánicos. Los residuos sólidos orgánicos son aquellos materiales sólidos o semisólidos de origen animal, humano o vegetal, y que pueden ser desechados, descartados o rechazados; además de tener como característica principal ser biodegradados (GTC53-7). Éstos pueden ser clasificados de acuerdo a su origen o a las características físicas, químicas y biológicas que presenten los residuos orgánicos.

1.1.1.1 Clasificación de Residuos Orgánicos.

- **Según su Origen.** Múltiples residuos orgánicos son clasificados de acuerdo a la actividad que los precede, de acuerdo a la Guía Técnica Colombiana 53-7, los residuos orgánicos pueden clasificarse en:
 - *Industrial:* residuos que provienen de la actividad industrial desarrollada por el humano.
 - *Agrícola:* residuos producidos por las actividades agrícolas y pecuarias del humano.
 - *Institucional o Doméstico:* residuos producidos por las actividades cotidianas y del vivir de las personas.
 - *Naturales:* residuos producidos sin la intervención de la actividad humana.
- **Según sus características físicas, químicas y biológicas.** De acuerdo a las características físicas, químicas y biológicas que los residuos orgánicos presenten, éstos se pueden clasificar en aprovechables y en no aprovechables. Estos pueden ser beneficiosos o perjudiciales para las personas, y los constituyentes de un medio ambiente (bióticos y abióticos). (Decreto 1713 del 2002)
- *Residuo Peligroso:* se denomina residuo o deshecho peligroso a aquel objeto, material, sustancia o elemento que tiene características tóxicas, infecciosas, corrosivas, volátiles, combustibles, radioactivas, y/o reactivas que pueden generar un riesgo a la salud humana o deterioro de la calidad ambiental que pueden desencadenar en afectaciones sobre el medio ambiente, plantas, animales y humanos. También es considerado como residuo peligroso a todo envase, empaque, y embalaje que estuvo en contacto con otro residuo peligroso, al igual que todo residuo que en su estado original no es considerado como

peligroso pero que con el tiempo debido a procesos naturales puede convertirse en residuo peligroso. (Decreto 1713 del 2002)

- *Residuo Sólido Aprovechable:* se considera un residuo o deshecho aprovechable a cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que no tiene valor en su uso directo o indirecto de quien lo genere, pero es posible ser incorporado en un proceso que puede generar otro producto o servicio de valor. (Decreto 1713 del 2002)
- *Residuo Sólido No Aprovechable:* se considera un residuo o deshecho no aprovechable a todo material, sustancia sólida o semisólida de origen orgánico o inorgánico que no puede ofrecer ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reintegración a un proceso productivo, y que puede ser de origen doméstico, industrial, comercial, institucional o de servicio. Estos residuos no generan valor, y generalmente requieren un tratamiento adicional para su disposición final. (Decreto 1713 del 2002)

1.1.2 Abonos Orgánicos. Los abonos orgánicos son definidos por la normativa colombiana como materiales de origen vegetal y/o animal estabilizado y manejado de manera ambientalmente limpia, tanto en su procesamiento como en el transporte, su principal funcionalidad es la de ser agregado al suelo fundamentalmente para la nutrición de las plantas, aunque puede servir como un recuperador de suelos. (Tomado de la NTC 1927:2012)

1.1.2.1 Fertilizantes Orgánicos Sólidos. Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos separados en la fuente o mezcla de los anteriores, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican en la NTC5167. (Tomado de la NTC 1927:2012)

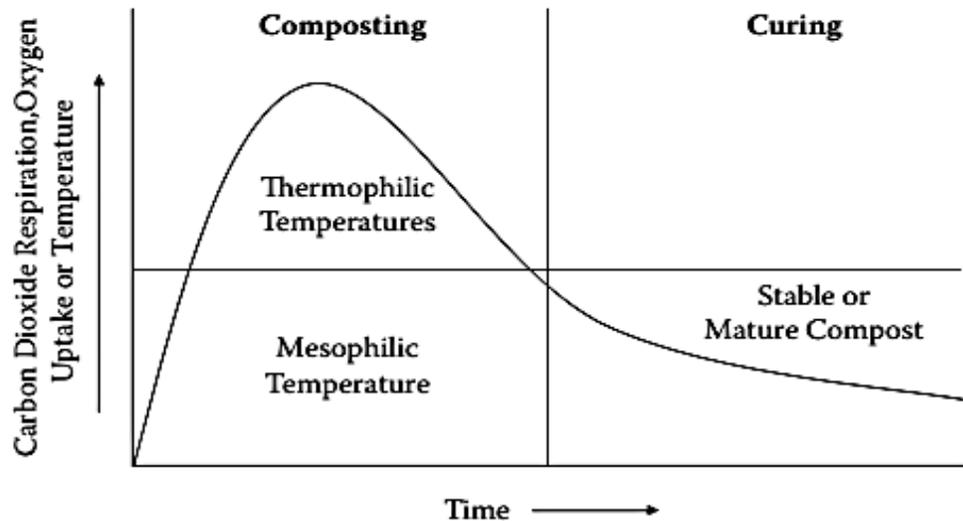
1.1.2.2 Fertilizantes Orgánico-minerales Sólidos. Producto sólido de origen animal, vegetal o proveniente de lodos de tratamiento de aguas residuales domésticas o agroindustriales estabilizados o de origen pedogenético; con o sin mezcla de abonos minerales, que contienen porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican en la NTC5167. (Tomado de la NTC 1927:2012)

1.1.2.3 Acondicionador de Suelo Orgánico. Producto de origen vegetal o animal, o vegetal y animal, estabilizado y manejado de manera ambientalmente limpia, que se aplica al suelo principalmente para mejorar sus propiedades físicas y biológicas. (Tomado de la NTC 1927:2012)

1.1.3 Compostaje. El compostaje se puede definir como el proceso de biodegradación de la materia orgánica, esta biodegradación es consecuencia de la actividad metabólica de los diversos microorganismos que crecen y se reproducen

en la materia orgánica en descomposición. El producto obtenido al final de éste proceso dependerá de los microorganismos involucrados¹ durante todas las etapas del proceso.

Figura 1. Comportamiento de respiración del CO₂, de consumo de O₂, y de temperatura en un proceso de compostaje.



Fuente. EPSTEIN, Elliot. Industrial Composting. Environmental Engineering and Facilities Management. 2011., p 16.

1.1.3.1 Tipos de Compostajes.

- *Compostaje Aerobio:* el compostaje aerobio como su nombre lo indica, es aquél que oxida la materia orgánica con ayuda de microorganismos aerobios y en presencia de O₂. Éste proceso se caracteriza por tener usualmente tres etapas metabólicas diferentes, la primera etapa es la etapa mesófila en la cual la población inicial de microorganismos aerobios inicia la biodegradación de biomoléculas simples, esta actividad microbiana libera una energía que incrementa la temperatura a valores cercanos a 45 °C. Posteriormente al alcanzar temperaturas mayores a 45 °C se inicia la fase termofílica, en la cual se permite la degradación de polisacáridos, proteínas y grasas. Éste incremento de temperatura permite al igual la destrucción de otros microorganismos patógenos, garantizando así un producto seguro, por otro lado, un buen indicador del proceso es la presencia de actinobacterias. Por último, el proceso continúa a la etapa de maduración en la cual se empieza a disminuir la temperatura del proceso, y los microorganismos que aún se encuentran, degradan estructuras de carbono complejas como lo son la celulosa y los

¹ OFICINA DE PLANEAMIENTO Y PRESUPUESTO UNIDAD DE DESARROLLO MUNICIPAL. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimiento. Febrero, 1999. Uruguay. 69 p.

polifenoles². Durante ésta última fase las características organolépticas del proceso mejoran considerablemente al no percibirse malos olores, y al observar la mejora del aspecto del compost.

- *Compostaje Anaerobio*: el proceso de compostaje anaerobio se produce la descomposición de la materia orgánica sin presencia de O₂ por medio de microorganismos anaerobios. El producto obtenido después del proceso generalmente está constituido por metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y lodos. Los lodos pueden ser empleados como fertilizante debido a su capacidad de mejorar los suelos³.

1.1.3.2 Sistemas de Compostaje.

- **Sistema Abierto.** Los sistemas de compostaje abierto son simples, y pueden ser divididos basados en el método de aireación que se emplee. El primer método es el de la pila estática, en el cual la aireación es por medio de la convección producida de forma natural por el aire, este método es el más básico y que no requiere de mucha inversión. El segundo método convencional es el de pila con volteo, el cual consiste en la aireación manual por parte del personal de operación, o por medio de asistencia mecánica. Éste último método de sistema de compostaje abierto debe tener una debida regulación debido a que el exceso de aireación puede afectar de forma negativa el proceso de compostaje, al igual que el no realizar la aireación de forma uniforme puede ocasionar que el proceso de compostaje ocurra de manera desigual en diferentes puntos.
 - *Pilas Estáticas*: este sistema, también conocido como pila con aireación forzada, el proceso consiste en el mezclado de todos los agentes de carga con el material a compostar. Posteriormente la pila se construye, sobre un sistema de aireación el cual está constituido por una tubería que debe atravesar la pila, al estar construida la pila se inicia el proceso de compostaje, el cual puede tener un tiempo de duración entre 2 y 4 meses. Una vez finalizado el proceso el material compostado pasa a un apantallamiento para acondicionar el material y recuperar material de los agentes de carga, y así posteriormente ser almacenado el producto obtenido.
 - *Pilas con Volteo*: éste proceso es uno de los más tradicionales y convencionales en la industria del compostaje. El término de volteo es asociado con la aireación del sistema por medio de la destrucción y reconstrucción de la pila con una frecuencia determinada. El volteo, además de promover la aireación de la pila, también permite la homogenización de todo el material que está siendo

² ONWOSI, Chukwudi O., et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. En: JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. 4/1.vol. 190, p. 142.

³ KIELY, Gerard. Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. España. McGraw Hill, 1993. V3. ISBN: 9788448120399., p. 55.

compostado. Hay varios factores que afectan el proceso del volteo, como lo son el área disponible y la cantidad de material que se está compostando, al igual que lo es la cantidad de humedad que contenga el material y la temperatura de la misma. Un exceso de aireación provocará una muy baja humedad y la disipación del calor generado por parte de los microorganismos, evitando así la sanitización del material. Si bien, junto a la pila estática, son los procesos más económicos; pueden tener problemas sanitarios y de plagas debido a que las pilas son de un gran tamaño y al aire libre.

- **Sistema Cerrado.** Los sistemas de compostaje cerrados, o también denominados biorreactores, son sistemas en los que se logra llevar un seguimiento y control de diferentes variables del proceso. Este sistema de compostaje puede ser clasificado en dos categorías, en biorreactores estáticos y biorreactores dinámicos; los cuales son regidos por el movimiento de la materia que éstos contienen. Los biorreactores pueden ser un gran sistema de compostaje, generalmente pueden acelerar la fase de degradación de al menos 7 a 15 días; y el tiempo de retención de los mismos varía dependiendo del tipo de sustrato empleado.
- *Reactores horizontales:* el sistema de reactores horizontales es básicamente de tanques cilíndricos, éstos pueden ser discontinuos o continuos, y de alimentación y descarga de forma axial. Los reactores horizontales pueden ser cargados y tener un sistema de mezclado por volteo, o con un mezclador interno, lo cual ayuda a la homogenización del material, al igual que permite que la temperatura y los microorganismos sea uniforme a través de la longitud del reactor. Los reactores pueden ser aislados térmicamente con el fin de disminuir las pérdidas de calor. Al igual que los otros reactores verticales, éstos requieren un costo de instalación muy alto, pero su tiempo de retención son muy bajos con respecto a las pilas de compostaje, y a la vez se tiene controlado los problemas sanitarios y de roedores.
- *Reactores verticales:* el sistema de reactores verticales son generalmente tanques cilíndricos y están hechos de acero y concreto, al igual que son aislados térmicamente. Como tal el sistema puede considerarse como un reactor continuo, se alimenta por la parte superior, y el compost es obtenido por la parte inferior en una banda transportadora. El sistema de aireación para alimentar O₂ a los microorganismos se realiza en la parte superior o inferior del reactor por medio de tubería con orificios que atraviesan al reactor. Por último, los gases generados durante el proceso son retirados y tratados por medio de un sistema de filtros, con el fin de disminuir y evitar el impacto negativo que éstos pueden ocasionar sobre el medio ambiente.

1.1.3.3 Variables de un Sistema de Compostaje.

- **Relación C/N.** Uno de los aspectos más importantes del balance de nutrientes es la relación de carbono orgánico con respecto al nitrógeno total. Éstos dos nutrientes son fundamentales en los procesos microbianos en el proceso de compostaje, éstos emplean el carbono para la energía y el crecimiento celular, mientras que el nitrógeno es empleado para la formación de células y síntesis de proteínas. Una alta relación de C/N puede perjudicar el proceso de compostaje, tanto que puede provocar la detención del proceso⁴.
- **pH.** Durante un proceso de compostaje es de gran importancia tener el pH en valores cercanos a la neutralidad o un poco superior a ésta (5.5-8.0), evitando así el crecimiento de hongos a valores de pH ácido. Durante el proceso el pH puede empezar de manera ácida debido a una mineralización de los metabolitos de bacterias de medio ácido y al crecimiento de las mismas, al finalizar este proceso el pH tiende a incrementarse a niveles alcalinos de alrededor de 8.0-8.5. Las altas temperaturas junto un alto pH provoca la volatilización de nitrógeno, lo cual puede ser agravado si hay presencia de cal en el sistema de compostaje⁵.
- **Temperatura.** El compostaje es un procedimiento bio-oxidativo de carácter exotérmico en el cual se llegan a alcanzar temperaturas del orden de 65-90 °C, la cual es conocida como la fase termófila, y en la que ocurre la muerte de la mayoría de los microorganismos que participan del proceso, al igual que la inhibición del crecimiento microbiano produciendo así la disminución de la velocidad de biodegradación de la materia orgánica. El rango de temperaturas para lograr una alta velocidad de biodegradación y máximo de diversidad microbiológica se encuentra entre los 30-45 °C, es dentro de este rango en la cual se logra tener el menor tiempo de retención durante el compostaje.
- **Humedad.** La Humedad es un parámetro determinante en aquellos residuos orgánicos como los lodos, aguas negras y otros deshechos, en sus procesos de aprovechamiento; en estos ejemplos la humedad puede llegar a ser hasta de un 90 %. Éstos niveles de humedad no son los adecuados y recomendados para un proceso de compostaje aerobio al no facilitar el tránsito de O₂ en el material de compostaje. El nivel de contenido de humedad al principio de un proceso de compostaje se debe encontrar entre un 45 y 75 %⁶; por otro lado, unos niveles

⁴ DÍAZ, L.F, BERTOLDI, M. and BIDLINGMAIR. W. Compost Science and Technology. Elsevier Science. Jul 29. 2011. 1-380., p.74.

⁵ Ibid., p, 75.

⁶ LI, Zhentong, et al. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. En: CHEMOSPHERE. Junio, 2013. vol. 93, no. 7, p. 1247-1257

muy bajos de humedad pueden producir un compost químicamente estable pero biológicamente inestable⁷.

- **Aireación.** En los procesos de compostaje aerobio la aireación es de gran importancia debido a que permite la alimentación de O₂ al proceso. El proceso de aireación puede cambiar dependiendo del sistema de compostaje empleado, en el caso de pilas estáticas éstas pueden tener aeración por acción del viento o por medio de un movimiento provocado mecánica o manualmente. Otro aspecto de gran importancia en el proceso de aireación es el de la porosidad del material que se está tratando, en la mayoría de los casos el oxígeno no llega a lugares en donde la porosidad es muy baja, provocando así una insuficiencia de O₂ en el proceso de compostaje aerobio⁸. Otro de los objetivos del parámetro de aireación es el evacuar la cantidad de CO₂ acumulado entre los poros del material de compostaje^{9 10}.

⁷ EPSTEIN, ELIOT. Industrial composting: environmental engineering and facilities management. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. 2011. 1-338., p. 19.

⁸ Ibid., p. 20.

⁹ NEGRO, M.J, VILLA. F, and AIBAR. J. Producción y gestión del compost. CIEMAT, DGA. Zaragoza, España. 2002. 1-31., p. 5.

¹⁰ RASAPORR, M, NASRABADI, M, KAMALI, M and HOVEIDI, H. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. 2009. Waste Management 29: 570-573., p. 573.

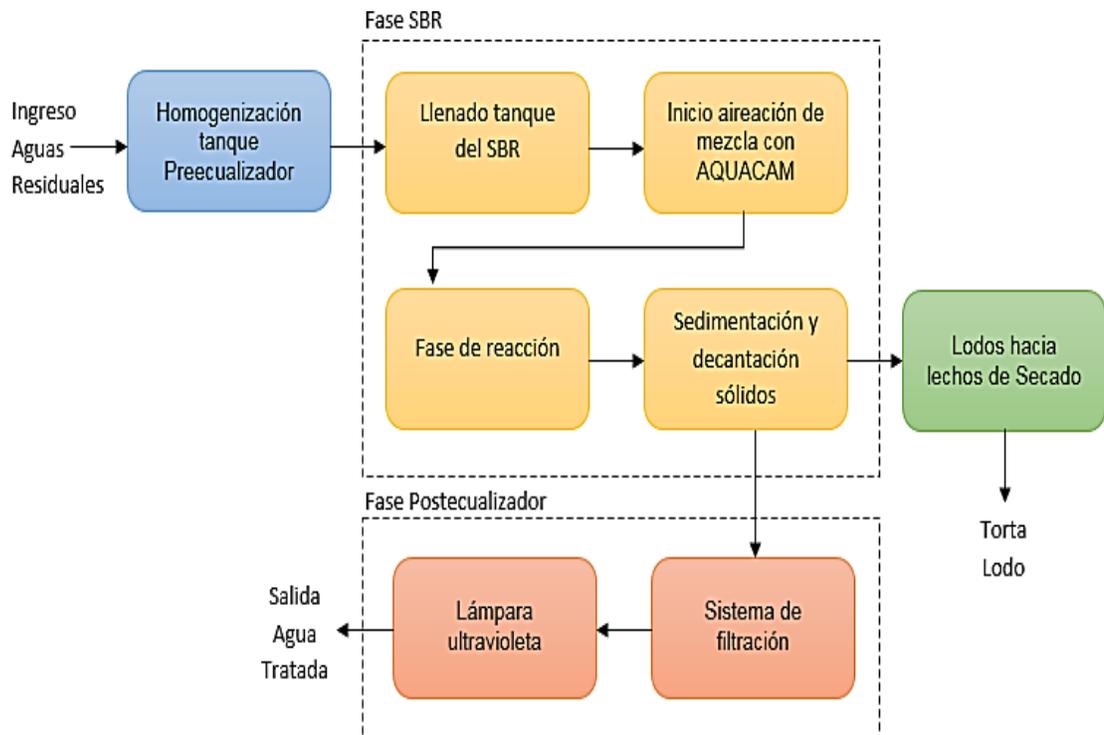
2. DIAGNÓSTICO

En el presente capítulo se muestra brevemente la descripción del proceso previo a la generación del lodo, para posteriormente proceder al diagnóstico del lodo generado por la PTAR del Colegio Rochester con el fin de conocer sus características aprovechables para la producción de un abono orgánico, las cantidades producidas y a tratar por medio del proceso de compostaje.

2.1 DESCRIPCIÓN DE PROCESO PREVIO A COMPOSTAJE DE LODOS

En el Colegio Rochester se cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales con el principal objetivo de disminuir la carga de aguas contaminadas hacia el río Bogotá, haciendo cumplir así la normatividad nacional vigente (decreto 3930 de 2010 de vertimientos). La operación global del proceso de tratamiento de aguas residuales consta de tres etapas principales, siendo el de la alimentación de aguas residuales al tanque de preecualización al inicio del proceso, posterior a esta etapa se encuentra el proceso llevado a cabo en el SBR (*Sequential Batch Reactor*), y por último llegando a la postecualización.

Figura 2. Diagrama de proceso planta de tratamiento de aguas residuales



2.1.1 Proceso en planta de tratamiento de aguas residuales.

- **Etapa de Tanque de Preecualización:** las aguas negras y grises provenientes de los baños y casino llegan al tanque de preecualización en el cual es homogeneizado el afluente. La función secundaria de este tanque es aumentar la eficiencia del proceso llevado a cabo en el SBR debido a que por medio de éste tanque se logra un flujo estable. La alimentación hacia el SBR se logra por medio del uso de dos bombas de transferencia sumergidas, y el proceso es controlado por medio del nivel de agua registrado en la piscina de preecualización.

- **Etapa de SBR:** la etapa del reactor SBR se caracteriza por tener 5 fases de operación, en las cuales ocurren diferentes procesos biológicos que garantizan la calidad del efluente. El sistema de reacción está principalmente constituido por sistemas de mezcla y de aireación, los cuales permiten alcanzar los objetivos de calidad, exigidos por la norma colombiana.
 - **Fase de llenado con mezcla:** en esta etapa el reactor recibe la nueva carga de agua residual proveniente del tanque de preecualización, con el fin de mezclar mecánicamente los sólidos suspendidos con ayuda del AQUACAM, éste último se encarga de suministrar oxígeno al SBR, lo cual fomenta la biodegradación de materia orgánica con ayuda de los microorganismos aerobios presentes.

 - **Fase de llenado con reacción:** en esta etapa el AQUACAM continúa con la aireación al agua y el mezclado de los sólidos suspendidos, con el objetivo de dar inicio al proceso de biodegradación por parte de los microorganismos. Durante esta etapa también se sigue realizando el proceso de llenado del reactor. Se debe aclarar que durante esta etapa ocurre el proceso de desnitrificación, con el fin que los microorganismos involucrados eliminen el exceso de nitrógeno amoniacal presente en las aguas.

 - **Fase de reacción:** el inicio de esta etapa se da cuando se suspende la alimentación de agua contaminada proveniente del tanque de preecualización al reactor. Durante esta etapa el AQUACAM aumenta la aireación y el mezclado, con el fin de aumentar los niveles de O₂ y favorecer el crecimiento de bacterias facultativas. El crecimiento de estas bacterias reduce los niveles de concentración de contaminantes de las aguas residuales, estos efectos se logran evidenciar con la disminución del DQO y el DBO₅ debido a la oxidación de la materia orgánica; al igual que la reducción del nitrógeno total.

 - **Fase de sedimentación:** en esta fase se cesa la actividad del AQUACAM y se mantiene la interrupción del flujo de aguas residuales al interior del reactor. A partir de que el AQUACAM es apagado se inicia el proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos presentes en el agua tratada, es en esta fase que el SBR actúa como un “clarificador estático”. Al finalizar la sedimentación los lodos

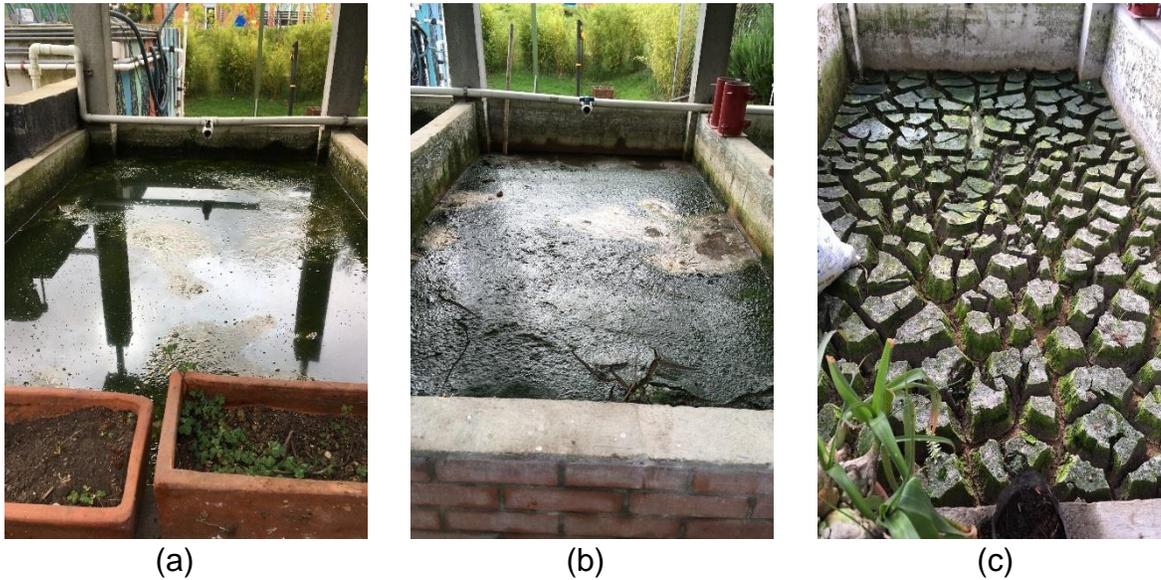
sedimentados son removidos del SBR con la ayuda de una bomba estacionaria sumergida, estos lodos son posteriormente enviados a los lechos de secado.

- **Fase de decantación:** en esta fase el AQUACAM retira el agua tratada para ser enviada al tanque de postecualizador. Durante éste proceso el AQUACAM se encarga de remover aproximadamente el volumen de agua alimentada durante el proceso de llenado del reactor, al igual que se encarga de la evasión de succión de espuma, y de sólidos suspendidos que hayan quedado. Éstos últimos son monitoreados por medio de sensores sumergidos que se encargan de cerrar las válvulas.
- **Etapa del Postecualizador:** la principal función del tanque de postecualización es la de reducir el caudal del líquido tratado hacia el sistema de filtrado, el cual está constituido por filtros de carbón activado, y filtros encordados y plisados de 5 y 10 micras. Previamente al envío de las aguas tratadas al sistema de filtrado, el líquido es tratado con sulfato de aluminio con el fin de disminuir la posible presencia de fósforo, luego de ello el líquido es enviado al sistema de filtros por medio de dos bombas de transferencia.

Luego de la remoción de partículas suspendidas por los filtros, el agua es tratada posteriormente por una lámpara de luz ultravioleta, la cual se encarga de la eliminación de microorganismos patógenos y virus. Esta etapa del proceso es controlada por medio de los niveles registrados en el postecualizador, el cual enciende el sistema de la lámpara ultravioleta al momento de alcanzar un nivel determinado en el tanque.

2.1.1 Lechos de secado. Posteriormente a la decantación de los lodos en la etapa del SBR, éstos son impulsados por medio de una bomba estacionaria sumergida hacia el reactor biológico para que sigan siendo tratados. Al finalizar esta fase, los lodos son enviados hacia los lechos de secado en los cuales los lodos son filtrados por medio de arena de río, y pueden durar aproximadamente de 3 a 4 semanas en el proceso de formación de una torta de lodo. Los lixiviados obtenidos durante éste proceso son recirculados hacia la PTAR con el fin de evitar la disposición de ellos en el medio ambiente. En la Imagen 1 se puede observar la evolución del proceso ocurrido en los lechos de secado.

Imagen 1. Lecho de secado con lodo residual al inicio (a), durante (b), y al final (c) del secado.



2.2 CARACTERIZACIÓN DEL LODO

2.2.1 Caracterización físico-química y microbiológica. En la determinación de las principales características del lodo fue necesario realizar el proceso de muestreo de acuerdo a lo establecido en la NTC5667-13¹¹, la cual instruye el procedimiento para muestreo en tortas de lodos provenientes de aguas residuales. El procedimiento indica tomar una porción de todas las capas de la torta que se encuentra en el lecho de secado, teniendo en cuenta el no tomar parte del lecho de arena, al igual que se debe evitar tomar porciones que contengan costras superficiales que aumenten la actividad anaerobia, evitando así tener dispersiones en los futuros análisis.

Una vez tomada la porción del lodo se realiza una reducción de tamaño de la muestra por medio de un cuarteo, el cual consiste en formar montos uniformes en formas de conos que deben ser mezclados tres veces. Posteriormente se procede a la división del montículo principal para formar los denominados cuartos, los cuales se deben mezclar de forma opuesta entre ellos, éste proceso se realiza hasta que los dos cuartos finales formados producen la masa de muestra requerida.

Luego de obtener la cantidad de muestra que se requiere, se procede a empacar la muestra en bolsas Ziploc®, las cuales están hechas de polietileno y son sellables, lo cual evita riesgos de transporte presentes en recipientes de vidrio, debido a la

¹¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 13 p.

posible generación de gases por parte del material transportado. En caso de ser necesario el almacenamiento o el transporte de gran trayecto de la muestra, ésta debe estar en temperaturas cercanas o inferiores a los 4 °C, al igual que se debe evitar la exposición al sol por prolongado tiempo. En la Imagen 2 se puede observar la muestra de lodo recolectada para su caracterización físico-química y microbiológica, la cual fue llevada a cabo por parte del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Se debe agregar que la metodología empleada por parte del Centro de Biosistemas para cada una de las variables solicitadas fue anexada junto a los resultados (ver Anexo B).

Imagen 2. Muestra de lodo enviada a la caracterización físico-química y microbiológica.



En la Tabla 1 se describen los procedimientos empleados por parte del Centro de Biosistemas para las principales características físico-químicas y microbiológicas del lodo. Se debe aclarar que se llega a la conclusión de no realizar análisis de metales pesados debido a que luego de un seguimiento minucioso con el ingeniero encargado del mantenimiento y manejo técnico del colegio, y con los análisis periódicos realizados en la PTAR, se determinó que estos metales son ausentes del proceso.

Tabla 1. Métodos empleados en el Centro de Biosistemas en la caracterización del lodo.

Parámetro	Método
Humedad	Gravimétrico a 70 °C en 24 h
Cenizas	Gravimétrico a 650 °C en 4 h
pH	Extracto de Saturación
Carbono Orgánico	Calcinación
Nitrógeno Total	Nitrógeno Kjeldhal
Conductividad Eléctrica	Extracto de Saturación
Coliformes Totales y Fecales	Recuento en placa
Mesófilos Aerobios	Recuento en Placa

Una vez obtenidos los análisis de los lodos, los cuales se pueden observar en la Tabla 2, se evidencia un valor de relación de C/N de 5,40 debido a la riqueza del nitrógeno presente (0,99 % en base húmeda) en el lodo, valores similares a los que reportan Rodríguez, L., et al. (2012)¹² y de Doublet, J., et. al (2010)¹³. Tal valor indica una muy baja relación C/N e implica la necesidad de recurrir a agentes de carga que permitan el incremento de la relación de C/N lo cual permitiría condiciones idóneas para el proceso de compostaje. Algunos autores como Kabbashi y Nassereldeen (2011)¹⁴, y Nayak y Kalamdhad (2015)¹⁵ establecen que el valor indicado de la relación C/N para el inicio de un proceso de compostaje aerobio de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales se puede encontrar entre 15 y 30 unidades de carbono por cada unidad de nitrógeno disponible, siendo éste último valor el más óptimo para llevar cabo un buen proceso de compostaje¹⁶.

Con respecto al porcentaje de humedad se observa que los lodos tienen un 79,81 % lo cual significa que tiene un alto contenido de humedad, algunos trabajos como Proietti, P., et al. (2016)¹⁷ resaltan la humedad como el parámetro más importante durante el proceso de compostaje, y establecen que el porcentaje de humedad inicial del proceso debe encontrarse entre 50 % y 65 %. Dicho lo anterior implica la necesidad de implementar agentes de carga con un bajo contenido de humedad al inicio del proceso de compostaje que se vaya a emplear. Por parte del pH se observa que los lodos al salir del proceso de secado son de carácter ácido al tener un valor de 5.70, valor muy cercano y parecido a los lodos tratados y

¹² RODRÍGUEZ, L., et al. Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage. En: Journal of environmental management. December, 2012. vol. 112, p. 285.

¹³ DOUBLET, Jérémy, et al. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. En: Waste management. April, 2010. vol. 30, no. 10, p. 1924.

¹⁴ KABBASHI, Nassereldeen. Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. En: Journal of environmental sciences. November 2011.vol. 23, no. 11, p. 1928.

¹⁵ NAYAK, A. K. y KALAMDHAD, A. S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. En: International journal of recycling of organic waste in agriculture. vol. 4, no. 4, p. 250-251.

¹⁶ Ibid., p. 258.

¹⁷ PROIETTI, Primo, et al. Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. En: Journal of cleaner production. 11/20.vol. 137, p. 1086-1099.

estudiados por Lloret., et al. (2013)¹⁸, y Himanen., et al. (2011)¹⁹, siendo éste último el que tiene el valor más parecido de pH, y a la vez empleado en un proceso de compostaje aerobio.

Tabla 2. Principales características físico-químicas y microbiológicas del lodo.

Variable	Unidad	Valor
Porcentaje de Humedad	%	79,81
Carbono Orgánico	%	5,34
Nitrógeno Total	%	0,99
Cenizas	%	42,57
pH	-logH+	5,70
C/N	p:p	5,40
Densidad Aparente	g*cm ⁻³	0,82
Coliformes Totales	UFC/g	2x10 ³
Coliformes Fecales	UFC/g	2x10 ²
E. Coli	UFC/g	0
Aerobios Mesófilos	UFC/g	1x10 ⁶

Con respecto a la caracterización microbiológica de los lodos se evidencia que hay ausencia de *E. Coli*, y que los niveles respecto a coliformes totales y fecales son bajos lo que significa que la planta de tratamiento está realizando un muy buen proceso de sanitización y que probablemente la sanitización del proceso no va a ser dispendioso para alcanzar las exigencias establecidas por la NTC5167 (2011)²⁰. Con respecto a los microorganismos aerobios mesófilos se observa que hay una considerable presencia de ellos (1x10⁶ UFC/g), lo cual puede ser beneficioso para el proceso de compostaje debido a que este se va a llevar de manera aerobia.

2.2.2 Caracterización cuantitativa del Lodo. Como se mencionó previamente, el tiempo de generación de una torta de lodo es de 3 a 4 semanas, el cual puede variar dependiendo las condiciones climáticas. Para la cuantificación de los lodos generados posteriormente al secado en los lechos fue necesario el dimensionamiento de los lechos de secado y de la torta formada, tales medidas se obtienen con la ayuda de una cinta métrica. La profundidad promedio de cada torta es de alrededor 20 cm, excluyendo el lecho filtrante constituido por arena de río, el cual tiene una altura de 20 cm. Como los lechos de secado tienen unas columnas como soporte del techo, es necesario hacer el descuento del espacio ocupado por estas columnas al momento de realizar los cálculos del volumen de lodos obtenidos

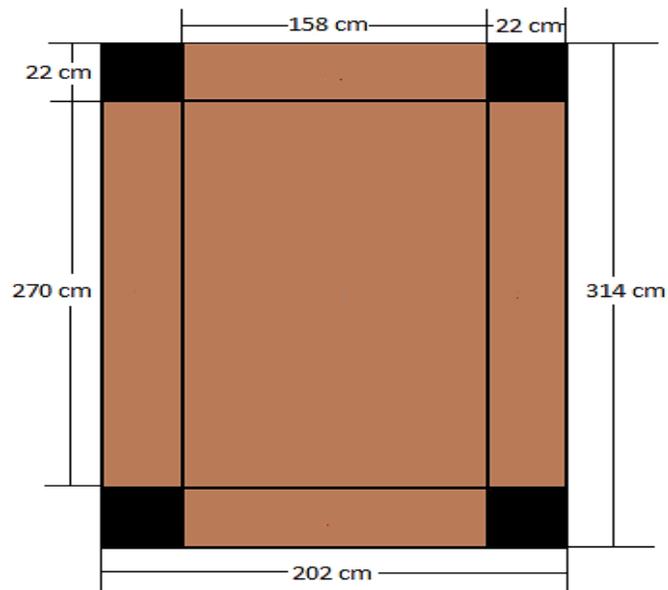
¹⁸ LLORET, Eva, et al. Two-stage mesophilic anaerobic-thermophilic digestion for sludge sanitation to obtain advanced treated sludge. En: Chemical engineering journal. August, 2013. vol. 230, p. 60.

¹⁹ HIMANEN, Marina y HÄNNINEN, Kari. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges - Effect of feedstock on the process and quality of compost. En: Bioresource technology. February, 2011.vol. 102, no. 3, p. 2843.

²⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. NTC 5167. Bogotá D. C.: El Instituto, 2011

mensualmente. Con las medidas estipuladas en la Figura 3 se calcula el volumen de lodo en cada lecho el cual es de 1,229 m³.

Figura 3. Lecho de secado con dimensiones de ancho y largo para la determinación de cantidades producidas mensualmente.



2.3 AGENTES DE CARGA

En la caracterización físico-química de los lodos se evidencia la necesidad de implementar agentes de carga que permitan adecuar las condiciones iniciales del proceso de compostaje, al igual que permita obtener un abono orgánico de calidad.

Teniendo en cuenta los principios de sostenibilidad promovidos por el Colegio Rochester se opta por emplear como agentes de carga los residuos orgánicos producidos en el casino, y la poda de césped generados en el mantenimiento de zonas verdes. Siendo los residuos orgánicos de casino los que en cantidad aportan carbono para aumentar la relación de C/N, mientras que la poda de césped aporta carbono, reduce la retención de humedad, y sirve como un muy buen activador del proceso de compostaje²¹. Se debe aclarar que en la pre-experimentación en vez de césped se empleó aserrín amarillo, con el cual se pretendía aumentar la relación C/N y disminuir la retención de humedad; el aserrín se adquiere por parte del colegio en un aserradero cercano. En la Tabla 3 se puede observar un resumen de las propiedades previamente mencionadas para el lodo y los otros agentes de carga a emplear. Los análisis físico-químicos de los agentes de carga, con excepción del aserrín, fueron realizados por parte del Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional en la ciudad de Bogotá.

²¹ ONWOS. Op cit., p. 150.

Para el aserrín se tomó el valor registrado por Nayak y Kalamdhad (2015)²² asociado al compostaje de lodos. Las muestras rotuladas y empacadas de los materiales se encuentran en el Anexo **A**, al igual que los formatos de entrega de resultados por parte de los laboratorios se consignan en el Anexo **B**.

Tabla 3. Caracterización del lodo y de los otros agentes de carga inicial en base húmeda.

Materia Prima	Carbono Orgánico Total (%)	Nitrógeno Total (%)	Relación C/N	Humedad (%)
Lodo	5,34	0,99	5,4	79,81
Residuos Orgánicos Casino	46,0	1,87	24,6	66,47
Aserrín Amarillo*	54,2	0,4	135,5	10,3
Poda de Césped	41,1	2,55	16,12	59,6

***Fuente.** NAYAK and KALAMDHAD. Int Journal Recycle Org Waste Agriculture. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. 2015., p 251.

De acuerdo a los análisis físico-químicos obtenidos se evidencia que los residuos orgánicos de casino presentan una relación de C/N relativamente alta (24,6) con respecto a los lodos (5,4) y un poco mayor con respecto a la presentada en el césped (16,12), debido a la cantidad considerable de carbono presente (46,0 %) y la baja cantidad de nitrógeno (1,87 %). Con respecto al césped se observa que es el agente de carga con mayor presencia de nitrógeno (2,55 %), al igual que presenta el menor porcentaje de humedad (59,6 %).

En la determinación de cantidades de césped y de residuo de casino generadas al mes, fue necesario remitirse a los registros de la gestión de residuos llevada a cabo por parte del colegio. En los registros se encuentra que el promedio de la generación mensual de la poda de césped es de 351,509 kg, y dicha cantidad proviene del mantenimiento de las áreas verdes y de la cancha de futbol, siendo el primero el que aporta la mayor cantidad por área y frecuencia de mantenimiento. Por el lado de los residuos orgánicos estos son cuantificados de manera semanal por parte del colegio debido a que parte de los residuos generados (lunes a viernes) son empleados para el compostaje de los residuos orgánicos con aserrín, mientras que otra parte es enviada a disposición final. El promedio aproximado de residuos orgánicos de casino generados semanalmente es de 900 kg, siendo así una cantidad aproximada de 3600 kg al mes.

²² NAYAK and KALAMDHAD. Int Journal Recycle Org Waste Agriculture. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. 2015., p 251.

Tabla 4. Cantidades másicas y volumétricas de cada materia prima producidas en un mes.

Materia Prima	Densidad Aparente (kg/m3)	Peso (kg)	Volumen (m3)
Lodos	820	3023,34	3,687
Residuos Orgánicos de Casino	1100	3600	3,273
Poda de Césped	86,67	351,509	4,056
Total	-	6974,849	11,016

En la Tabla 4 se encuentra recopilada la información de cantidades másicas y volumétricas de los lodos y los materiales de carga a emplear. Las cantidades volumétricas fueron determinadas con la ayuda de la densidad aparente, la cual fue determinada por parte del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

3. SELECCIÓN DEL 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, al igual que se parametrizan las variables de entrada del proceso. También se detalla la metodología empleada para el planteamiento y elaboración del montaje experimental del proceso, al igual que los procedimientos empleados para el seguimiento de las variables de proceso de interés, como lo son la temperatura, pH, humedad y cenizas.

3.1 MATRIZ DE SELECCIÓN PROCESO DE COMPOSTAJE

Los procesos de compostaje como se menciona previamente, en el Capítulo 1 de Generalidades, pueden ser llevados a cabo en sistemas abiertos o cerrados, éstos primeros son subdivididos en pilas estáticas, y pilas con volteo, mientras que los segundos son conocidos como los reactores, y son divididos en reactores horizontales y verticales, y al igual que las pilas, se subdividen en reactores estáticos, y reactores con volteo. Para la selección del proceso de compostaje a emplear es necesario establecer unos factores o criterios de selección, los cuales se instauran con respecto a las necesidades expresadas por el Colegio Rochester.

Se realiza un recuento de las ventajas y desventajas que pueden ofrecer cada uno de los procesos de compostaje que se van a evaluar por medio de la matriz de selección (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los diferentes procesos de compostaje.

Proceso de Compostaje	Ventajas	Desventajas o Limitaciones
Pila Estática	Puede ser empleado para pequeñas y grandes cantidades de residuos, al igual que su tiempo de procesamiento dependerá del material a compostar (3 semanas a 4 meses). No requiere de equipos complementarios costosos lo cual lo convierte en el más económico de todos los procesos.	El tratamiento de grandes cantidades de residuos puede derivar en el aumento de tiempo de compostaje, al igual que una no homogenización de la mezcla a compostar. No se puede emplear cualquier residuo orgánico en diferentes condiciones, al igual que puede presentar problemas sanitarios como lo son los malos olores, plagas, vectores, y algunas enfermedades. El material en el núcleo de la pila puede presentar compactaciones produciendo así zonas anaerobias, lo cual vuelve lento el proceso. La generación de gases por parte del proceso no puede ser controlada.

Tabla 5. (Continuación)

Proceso de Compostaje	Ventajas	Desventajas o Limitaciones
Pila Estática		Por otro lado, puede llegar a requerir grandes extensiones de terreno.
Pila con Volteo	No requiere de altos costos al requerir solo los implementos para el volteo, el cual puede ser manual o con maquinaria. El volteo que se realiza permite la homogenización y aireación en todo el material, permitiendo que el proceso ocurra en toda la pila. Otro beneficio del volteo es el control y disminución del exceso de humedad y la prevención de compactación, evitando así la formación de zonas anaerobias.	El mayor problema es el de la salud pública al contener patógenos y generar malos olores. Ser un foco de roedores y vectores. El volteo promueve la disipación de calor generado, lo cual perjudica el proceso. Si la pila llega a ser muy grande la inversión en maquinaria para el volteo puede llegar a ser considerable, al igual que de requerir de grandes extensiones de tierra. Los gases generados por el proceso no son controlados.
Reactor Vertical	Permite controlar las diferentes variables del proceso como son la temperatura, humedad, O ₂ , entre otras, lo cual permite mejorar la calidad del producto. Puede ser aireado con tubería interna, y tener un mezclador con propela permitiendo una mejor eficiencia. Pueden ser de gran y pequeña escala, lo cual permite manejar diferentes volúmenes. El tiempo de operación oscila entre 7 a 20 días, aunque puede ser superior si no se opera en condiciones ideales. Los gases generados son tratados por medio de filtros. En algunos casos tienen aislamiento lo que permite conservar el calor generado para alcanzar temperaturas deseadas. Evita problemas sanitarios al ser un sistema cerrado.	El costo inicial es muy alto al requerir el control de diferentes variables, al igual que los materiales de construcción del reactor. Su mantenimiento, al igual que la operación es alto al necesitar personal especializado. Parte del material antes y después del proceso requiere adecuaciones. Su sistema de mezclado tiene una limitación al tener acumulaciones en el fondo del reactor.
Reactor Horizontal	Permite controlar las diferentes variables del proceso como son la temperatura, humedad, O ₂ , entre otras. Es aireado por medio de tubería interna que permite el flujo de aire. El reactor puede tener internamente álabes que permiten el mezclado.	El costo inicial es muy alto al requerir el control de diferentes variables, al igual que los materiales de construcción del reactor. Su mantenimiento, al igual que la operación es alto al necesitar personal especializado. Parte del material antes y después del proceso requiere adecuaciones.

Tabla 5. (Continuación)

Proceso de Compostaje	Ventajas	Desventajas o Limitaciones
Reactor Horizontal	El tiempo de retención en el reactor es corto al ser de 3 a 20 días, dependiendo de las condiciones. Capacidad de operar de manera continua o discontinua, al igual que puede ser operado de forma estática o con volteo, ésta última es la que mejor resultados presenta. Los gases generados en el proceso son tratados por medio de filtros. El aislamiento empleado en ellos permite la preservación de calor, lo cual aumenta la temperatura para eliminar los patógenos. Evita problemas sanitarios al ser un sistema cerrado.	

Fuente. DÍAZ. L. F, BERTOLDI, M. y BIDLINGMAIR. W. Compost Science and Technology. Elsevier., p. 67-87.

El primero de los criterios de selección es el tiempo de duración del proceso, los residuos generados se deben manejar y aprovechar en el menor tiempo posible debido a que el colegio no tiene la infraestructura para almacenar y controlar en grandes cantidades los residuos orgánicos. Un segundo criterio de selección está relacionado con la salubridad del proceso, debido a que este se va a llevar a cabo en una institución educativa, se debe tener el debido cuidado con el control y prevención de plagas, vectores y enfermedades causadas por el mal manejo y control de los residuos; al igual que se debe garantizar la sanidad del producto. El tercer criterio de selección es el de la eficiencia del proceso, éste tiene gran relevancia, permite dimensionar aproximadamente la cantidad de producto a obtener a partir de una cantidad de residuos orgánicos de cada uno de los procesos a evaluar. Un cuarto carácter a tener en cuenta es 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 cualquier proceso de selección es de menester involucrar el criterio de los costos para cada una de las opciones a evaluar.

Una vez establecidos los criterios de selección, se procede a establecer la metodología con la cual se seleccionará el sistema de compostaje. Para la evaluación se van a implementar factores ponderados, los cuales le darán un peso específico a cada uno de los criterios a evaluar, dichos factores son establecidos con respecto a las necesidades expresadas por el colegio. Con respecto a los valores de evaluación para la matriz de selección son de 10 (bajo), 30 (medio), y 50 (alto). El proceso de compostaje que adquiera el mayor valor del puntaje neto será el proceso de compostaje que se empleará para la propuesta.

Tabla 6. Matriz de selección de proceso de compostaje a emplear en la propuesta.

Criterio		Procesos de Compostaje					
Descripción	Peso Calificación	Pila Estática	Pila Aireada	Reactor Horizontal Estático	Reactor Vertical Estático	Reactor Horizontal Volteo	Reactor Vertical Volteo
Tiempo Proceso	20%	10	10	30	30	50	30
Salubridad Proceso	20%	10	10	50	50	50	50
Eficiencia Proceso	25%	30	30	50	50	50	50
Área Disponible	15%	30	30	30	50	50	50
Costos Proceso	20%	50	50	10	10	10	10
Total	100%	26	26	35	38	42	38

*La calificación 10 es bajo, 30 es medio, 50 es alto.

De acuerdo a lo evaluado en la matriz de selección (Tabla 6), la opción que se ajusta mejor a las necesidades y criterios solicitados por el colegio es el reactor horizontal con volteo, el cual obtuvo un puntaje total de 42. Al establecer esta modalidad de compostaje, se procede a realizar unas especificaciones de operación del mismo, como lo es el sistema de generación y preservación de calor, y la aireación.

Para la configuración del sistema de compostaje hay múltiples opciones como explican en su trabajo I. G. Mason y M. W. Mike (2005)²³, las configuraciones base que se exponen en dicho trabajo son involucradas directamente con el control de la temperatura y del flujo del calor. Al observar las diferentes configuraciones para el control de la temperatura y calor en los reactores, se opta por seleccionar la configuración de Auto-Calentamiento, debido a que las demás opciones representan altas inversiones en sistemas de control, al igual que el generar o retirar calor a escala industrial significan mayores costos y consumos energéticos al momento de hablar de la operación. Por otro lado, el aislamiento requerido en la configuración seleccionada tiene una gran importancia al momento de manejar pequeños volúmenes (escala laboratorio) con el fin de preservar el calor generado. Dicho aislamiento perderá relevancia al momento de llevar el proceso a mayores volúmenes (escala piloto o industrial) debido a que el calor se preserva más en mayores cantidades, lo cual implicaría tentativamente una menor cantidad de costos en comparación a las demás configuraciones expuestas en la Tabla 7.

²³ MASON, I. G. y MILKE, M. W. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. En: Waste management. March, 2005. vol. 25, no. 5, p. 484.

Tabla 7. Configuraciones de control de temperatura y calor para los reactores empleados en compostaje.

Configuración Reactor	Definición
<i>Temperatura Corregida</i>	La temperatura deseada en el reactor es controlada por un medio externo, lo cual implica una adición o retiro de calor en el sistema
<i>Auto-Calentamiento</i>	El calor generado por los microorganismos es el único empleado en el proceso, y la temperatura se controla únicamente por medio de aislamientos térmicos en el equipo.
<i>Temperatura Diferencial corregida</i>	El calor generado al principio del proceso es generado por parte de los microorganismos involucrados en el proceso, pero al llegar a temperaturas diferenciales deseadas en todo el material de compostaje se mantiene dicha temperatura por medio de adición o retiro de calor en el sistema a través de las paredes.
<i>Flujo de Calor Controlado</i>	El calor al principio del proceso es generado por parte de los microorganismos involucrados en el proceso, pero al llegar a una temperatura deseadas en todo el material de compostaje se mantiene esa temperatura por medio de adición o retiro de un flujo de calor uniforme en el sistema a través de las paredes.

Fuente. MASON, I. G. y MILKE, M. W. Waste Management. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. 2005., p. 484.

Con respecto al sistema de aireación para las unidades a escala laboratorio, se va a optar por la aireación por medio de la rotación manual y con la ayuda de una abertura en una de las caras del reactor horizontal, por la cual va a circular el aire. En el momento de realizar un escalamiento a una unidad mayor seguramente se va a requerir de la adquisición de motores que permitan el volteo, y de la implementación de un sistema de aireación para los reactores.

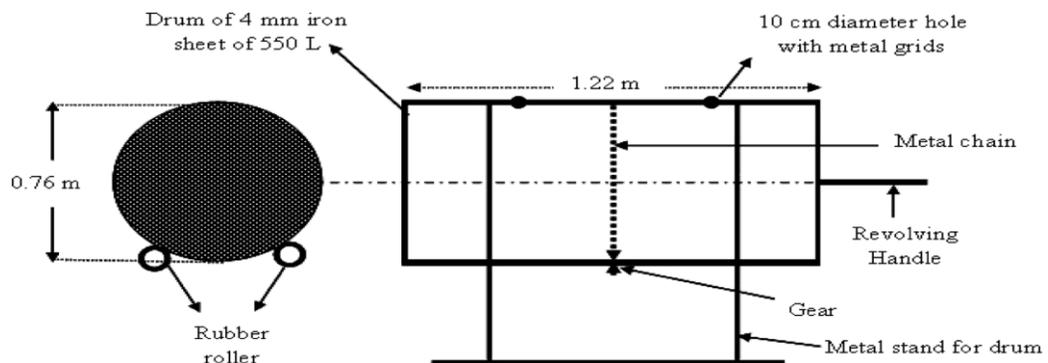
3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTACIÓN

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 en continuo a escala laboratorio requiere de accesorios sofisticados para lograr las condiciones ideales de proceso, los cuales incrementarían los costos del proyecto. Para la planeación y construcción de los reactores se realizó una consulta de trabajos de compostaje aerobio que emplean los reactores horizontales con volteo como proceso de compostaje en el tratamiento de lodos provenientes de plantas de aguas residuales y que involucren otros materiales orgánicos.

Durante el proceso de consulta e indagación para la planeación del reactor base a construir se encuentra en el trabajo realizado por Nayak y Kalamdhad (2015)²⁴ que los lodos residuales son tratados por medio de un compostaje aerobio, el cual es llevado a cabo en un tambor rotatorio de compostaje a escala piloto. Este reactor se caracteriza por ser de cuerpo de hierro y por tener un recubrimiento interno de pintura anticorrosiva; al igual que son ubicados en soportes con ruedas las cuales permiten la rotación de los reactores. El reactor propuesto también ostenta en su pared interior un conjunto de aletas tipo cuchara, con el fin de permitir la homogenización del material interno, y la distribución de O₂ presente en el aire que ingresa por las compuertas laterales y por pequeños agujeros ubicados en la parte superior del reactor.

Singh y Kalamdhad (2014)²⁵ exponen y aplican el uso de un reactor horizontal empleado en el compostaje de residuos orgánicos alimenticios. Dicho reactor tiene un principio de operación similar al reactor que se menciona previamente, sólo que éste emplea una compuerta lateral para muestras, y carece del uso de aletas internas para el mezclado. Se debe precisar que para ambos casos los autores fijaron un tiempo de retención de 20 días a unas determinadas condiciones, al igual que el mecanismo de rotación de los reactores es de forma manual con la ayuda de una manivela.

Ilustración 1. Esquema de reactor horizontal con rotación manual empleado en el compostaje aerobio de lodos.



Fuente. NAYAK, A. K. y KALAMDHAD, A. S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. vol. 4, no. 4, p. 252.

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

²⁴ NAYAK, A. K. y KALAMDHAD, A. S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. En: *International journal of recycling of organic waste in agriculture*. December, 2015. vol. 4, no. 4, p. 252.

²⁵ SINGH, J. y KALAMDHAD, A. S. Effect of carbide sludge (lime) on bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of water hyacinth. En: *Chemical speciation and bioavailability*. 2014, vol. 26, no. 2, p. 77.

construcción de los mismos, se debe aclarar que el experimento se va a hacer por medio de un triplicado con la finalidad de tener confiabilidad y respaldo de los datos obtenidos, por lo mencionado previamente se opta por la construcción de tres reactores. 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 y su inmunidad a la corrosión ocasionada por parte de los lixiviados; las dimensiones de cada una de las canecas son de 34 cm de diámetro por 65 cm de largo (Imagen 3a). Con respecto a tornillos, arandelas, bisagras, y pasadores, se adquieren en acero inoxidable con el fin de prevenir también el efecto negativo por parte de la corrosión sobre éstos. En la cara opuesta a la tapa removible de cada reactor se realiza una abertura en la cual se ubica una válvula de 1/4", en la cual se va a permitir el drenaje de los lixiviados a contenedores conectados con mangueras de 1/4". Para las aletas o álabes internos empleados para el mezclado del material en compostaje se toma, y divide por la mitad de forma vertical un tubo de 4" de diámetro y 45 cm de largo, estas mitades fueron luego fijadas en las paredes del reactor una transpuesta a la posición de la otra como se puede observar en la Imagen 3b; la rotación de los reactores es en contra del sentido de las manecillas del reloj. El procedimiento base de construcción de los reactores, y de las bases de los mismos fue tomado del video realizado por Days Well Spent²⁶.

Imagen 3. Vista exterior (a), interior (b) del reactor si aislante, y perfil lateral del reactor con el soporte para la rotación (c).



(a)



(b)

²⁶ DAYS WELL SPENT. How to build a compost tumbler? [En línea]. United States: Margaret. 2015., 1 p. Disponible en <http://www.dayswellspent.com/how-to-build-a-compost-tumbler/#more-2663>.

Imagen 3. (Continuación)



(c)

Para el aislamiento de los reactores se empleó espuma de poliuretano la cual es recomendada por Rodríguez., et al. (2012)²⁷ en los procesos de compostaje a escala laboratorio, debido a que en el ensayo el volumen a compostar es pequeño, y hay una menor generación y preservación de calor.

Imagen 4. Reactor instalado recubierto con el material aislante (Espuma de Poliuretano).



²⁷ RODRÍGUEZ. Op cit., p. 287.

Tabla 8. Especificaciones de reactor y soporte empleado en el experimento.

Parámetro		Valor	Unidad
Longitud del reactor	L_{reactor}	0,65	m
Diámetro reactor sin aislante	$D_{\text{sin aislante}}$	0,34	m
Diámetro reactor con aislante	$D_{\text{con aislante}}$	0,355	m
Volumen del reactor	V_{reactor}	0,059	m ³
Masa reactor vacío	$m_{\text{reactor vacío}}$	4,60	kg
Masa reactor lleno con mezcla	$m_{\text{reactor lleno}}$	29,60	kg
Diámetro abertura para circulación de aire en la tapa	$D_{\text{abertura tapa}}$	0,085	m
Área abertura para circulación de aire en la tapa	$A_{\text{abertura tapa}}$	0,023	m ²
Longitud de Soporte	L_{soporte}	0,74	m
Ancho de Soporte	W_{soporte}	0,41	m
Distancia entre arista marco y rueda	$L_{\text{borde,rueda}}$	0,22	m
Distancia entre rudas	L_{ruedas}	0,3	m

3.2.2 Parametrización de variables iniciales del proceso. Para la parametrización de variables de entrada del proceso como lo son la humedad, la relación C/N, y el tamaño de partícula, se realizó una consulta bibliográfica de diferentes autores que estudian el efecto de las variables mencionadas. Dicha información se puede ver resumida en la Tabla 9.

Tabla 9. Recolección bibliográfica para la determinación de humedad, relación C/N, y tamaño de partícula.

Referente	Tamaño de Partícula (cm)	Relación C/N	Humedad (%)
Kalamdhad, A. S., Kazmi (2009)	2	22	61
Kalamdhad, A. S., et al. (2009)	1 – 2	-	70 – 75
Yuan, Jing, et al. (2016)	2 – 4	11.37	-
Tiquia, S. M. (2005)	-	16 – 28	50 – 70
Mohee, Romeela y Mudhoo, Ackmez. (2005)	1.5 – 2	25 – 35	50 – 70
Wu, Shaohua, et al. (2016)	-	20 – 25	70
Himanen, Marina y Hänninen, Kari. (2011)	-	15 – 20	30 – 50
Yañez, R.; Alonso, J. L. y Díaz, M. J. (2009)	4	10 – 15	60 – 70

Con respecto a la frecuencia de aireación de un reactor rotatorio, varios autores recomiendan el trabajo desarrollado por Kalamdhad y Kazmi (2009)²⁸ en el cual evalúan el efecto de la frecuencia de aireación en un compostador horizontal rotatorio. Kalamdhad y Kazmi evalúan la frecuencia de aireación cada 6, 12, 18, y 24 horas durante 15 días, llegando a la conclusión que el experimento con mejor resultados es el de una frecuencia de aireación cada 24 horas, en el cual se llegan a las mayores temperaturas, se alcanza la mejor biodegradación, y las mejores características para la producción de un abono orgánico. Mientras que los demás experimentos registraron menores temperaturas debido a la disipación de calor por el exceso de aireación, al igual que mostraban una gran pérdida de nitrógeno perjudicando así la nitrificación desarrollada por parte de los microorganismos en el proceso de mineralización. Por lo mencionado anteriormente se opta por realizar la frecuencia de aireación cada 24 horas durante los 20 días en los que se van a llevar a cabo la pre-experimentación y experimentación.

Con base en la información suministrada en la Tabla 9 se establece que el tamaño de partícula con el que se va a empezar el proceso se encontrará entre 2 y 4 cm, la cual de acuerdo a Onwosi, Chukwudi O., et al. (2017)²⁹ y algunos autores citados en la tabla permite una mejor circulación del O₂ y una mayor velocidad de degradación por parte de los microorganismos al haber una mayor área de

²⁸ KALAMDHAD, A. S. y KAZMI, A. A. Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. En: Chemosphere. March, 2009. vol. 74, no. 10, p. 1327-1334.

²⁹ ONWOSI. Op cit., p. 146.

contacto³⁰. Se debe agregar que un tamaño de partícula inferior a los recomendados en la tabla puede generar compactaciones y por ende zonas anaerobias donde la degradación del material puede ser lenta o nula.

Con respecto a la relación de C/N inicial del proceso se establece que ésta debe encontrarse entre 15 y 25, los procesos que inician con una relación dentro dicho intervalo producen abonos orgánicos de calidad para la implementación en actividades agrícolas. Por el lado de la humedad, como se mencionó en el Capítulo 1, una alta humedad puede ser perjudicial para la eficiencia del proceso al disminuir el transporte de oxígeno en el material en compostaje, al igual que una baja humedad significaría una insuficiencia de agua disponible para los microorganismos, por tales motivos se decide tomar una humedad que se encuentre entre el 60 y 70 %³¹.

3.2.3 Protocolos de medición para las variables. Al momento de planear y establecer los protocolos de seguimiento de las variables del proceso es necesario realizar una clasificación de ellas a causa de las limitaciones instrumentales, debido a que unas son medidas en el lugar que se lleva a cabo la experimentación (in-situ) y otras son determinadas en un laboratorio ajeno a la institución educativa (ex-situ).

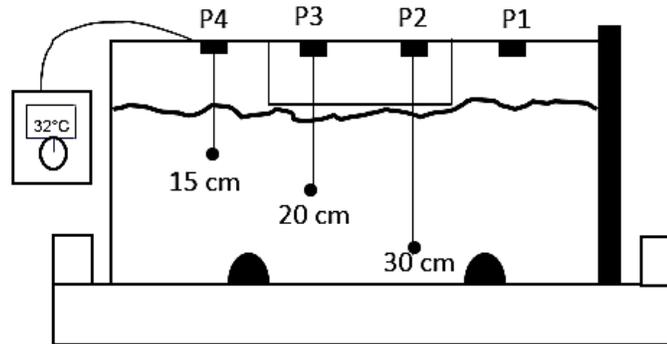
3.2.3.1 Seguimientos variables in-situ del proceso.

- **Temperatura:** en la medición de la temperatura, se emplea un multímetro de referencia UNI-T UT200 series (Anexo C), el cual tiene la opción de medir la temperatura por medio de una termocupla tipo K. Para el cuidado y preservación de las funcionalidades del equipo se le realiza una modificación estructural en la parte de la termocupla, a la cual se le añade una varilla con una cinta métrica, las cuales permiten dar firmeza, y conocimiento de la profundidad a la cual se está realizando la medición. Para establecer una temperatura uniforme en cada reactor, se realizan las mediciones a tres diferentes profundidades de 15 cm, 20 cm, y 30 cm, y a diferentes distancias transversales del mismo reactor, equidistantes entre sí por 13,7 cm. Se debe aclarar que la medición de la temperatura siempre se realizó previamente a la agitación y aireación de cada reactor, evitando así errores por la disipación de calor.

³⁰ MOHEE, Romeela y MUDHOO, Ackmez. Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. En: Powder technology. July, 2005. vol. 155, no. 1, p. 93.

³¹ RODRÍGUEZ. Op cit., p. 287.

Ilustración 2. Profundidades y puntos de medición para la temperatura.



En cada punto (P1, P2, P3 y P4) se registran valores de temperatura a diferentes profundidades (15, 20 y 30 cm). El valor de temperatura en cada profundidad fue reportado una vez su valor se estabiliza. Para asegurar que el termómetro presenta la misma incertidumbre en la medición se llevaba hasta enfriamiento a temperatura ambiente y se seguía a medir el punto siguiente.

- **pH:** en la medición de pH, se emplea un *checker* de campo de referencia HI98103 (Anexo C) fabricado por HANNA® Instruments, el cual se adquirió con sus respectivas soluciones calibradoras certificadas por el fabricante. Para la medición de este parámetro se toman las muestras del material en diferentes puntos del reactor después de que éste es agitado y aireado, dado que ésta puede cambiar en diferentes puntos del reactor.

El procedimiento para la medición de pH consiste en limpiar con abundante agua destilada la parte del electrodo, para luego proseguir a la calibración del equipo con las soluciones calibradoras. El muestreo se realiza en tres puntos diferentes transversales del reactor, accediendo por medio de la compuerta lateral instalada, cada muestra tomada debe ser de 5 gramos para posteriormente diluirla en 25 ml de agua des-ionizada, y así obtener un extracto de 1:5 g/ml como sugieren González-Fernández, J. Jorge, et al. (2015)³², y Niwagaba, C., et al. (2009)³³. Una vez obtenido el extracto se procede a sumergir el instrumento en cada una de las muestras, limpiando el equipo agua destilada en cada intervalo de medición con el fin de evitar grandes dispersiones en las medidas.

3.1.1 Seguimientos variables ex-situ del proceso. Para las variables ex-situ fue necesario la toma de muestras, y almacenamiento de las mismas a una temperatura de 4°C y en bolsas Ziploc®. Los análisis de humedad y cenizas fueron realizados en los laboratorios del Centro de Gestión Industrial del SENA.

³² GONZÁLEZ - FERNÁNDEZ, J. Jorge, et al. Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. En: Journal of environmental management. January, 2015. vol. 147, p. 134.

³³ NIWAGABA, C., et al. Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. En: Waste management. February, 2009. vol. 29, no. 2, p. 585-589.

- **Humedad:** la humedad fue determinada por un método gravimétrico de acuerdo a la NTC1495 (2013)³⁴, la cual consiste en la diferencia de peso antes y después del calentamiento de la muestra contenida en un recipiente. Tal proceso se llevó a cabo en una termobalanza, la cual va registrando la variación del peso a medida que se va secando la muestra a una temperatura de 150°C. El resultado de humedad es registrado cuando el peso registrado no varía.
- **Cenizas:** las cenizas se cuantificaron por medio del método de calcinación de acuerdo a la NTC1886 (1983)³⁵, en el cual se realiza una diferencia del peso de la muestra antes y después de la calcinación. El procedimiento se lleva a cabo en una mufla, en la cual los crisoles con las muestras son introducidos y calentados hasta 650°C durante 4 horas. Al finalizar el tiempo de calcinación se introducen las muestras en el desecador con el fin de que disminuyan su temperatura sin captar humedad, y así posteriormente realizar la diferencia de pesos registrados.

3.3 ACONDICIONAMIENTO LUGAR DE TRABAJO

Para el desarrollo del experimento, el lugar de trabajo es seleccionado teniendo en cuenta la cercanía de los lechos de secado de lodos, y del lugar de adecuación de los materiales de carga necesarios para el proceso planteado, al igual que la protección de los reactores de la exposición directa al sol y la lluvia. Como no se dispone de un lugar cerrado y con infraestructura de base, es necesario la adaptación de una porción del terreno del colegio en el cual se cumplan las condiciones establecidas al principio. Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente se opta por la instalación de un toldo que es empleado como invernadero en jardinería, y es ubicado al lado de los lechos de secado en un terreno cuyas dimensiones son de 4 m de ancho y 6 m de largo.

³⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar el contenido de agua (Humedad) de suelos y rocas, con base en la masa. NTC 1495. Bogotá D.C.: El instituto, 2013. 6 p.

³⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica. NTC 1886. Bogotá D.C.: El instituto, 1983. 7 p.

Imagen 5. Lugar de trabajo del montaje experimental.



Imagen 6. Localización del montaje experimental en la zona de la PTAR.



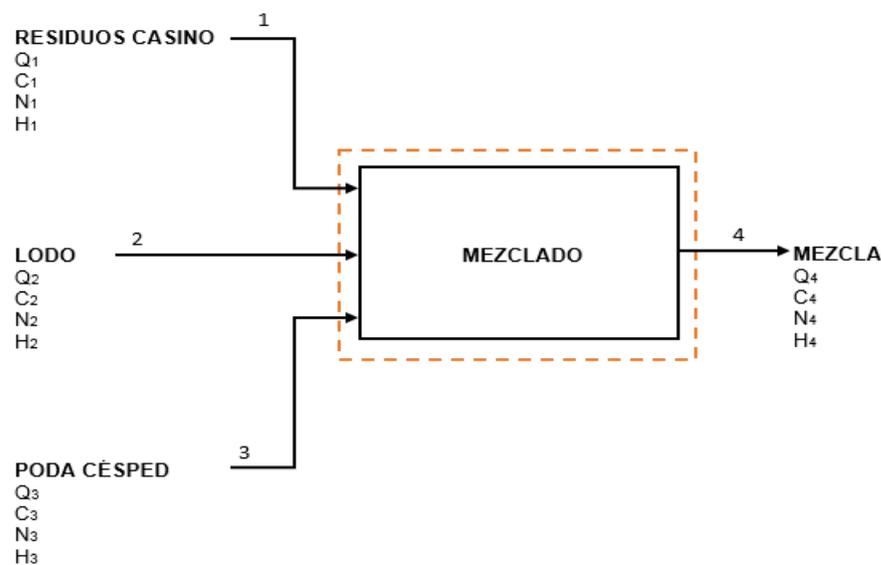
Fuente. Google Maps. 2017.

3.4 ADECUACIÓN Y BALANCE DE MATERIALES DE COMPOSTAJE

En esta etapa se realiza la adecuación previa del lodo y materiales de carga empleados en el compostaje, al igual que se homogeniza la mezcla a cargar cumpliendo con los requerimientos establecidos previamente de humedad, tamaño de partícula y balance de los nutrientes carbono/nitrógeno.

Con la finalidad de alcanzar un valor de la relación de C/N deseado dentro de los límites establecidos (15 a 25) se debe realizar un balance de cada uno de los nutrientes aportados por los agentes de carga. Aunque para una mayor rigurosidad del cálculo de las cantidades de carga necesarias para alcanzar una relación de C/N deseada, Tom Richard y Nancy Trautmann de la Universidad de Cornell³⁶ recomiendan un balance que involucra la humedad aportada por cada uno de los agentes de carga, el desarrollo detallado para llegar a tales expresiones se encuentra en el Anexo E. Para una mejor ilustración del origen de los balances en la Figura 5 se muestra la masa de control de un mezclador con las variables correspondientes a cada corriente.

Figura 4. Esquema del balance de materiales.



En la solución de las ecuaciones de humedad de entrada, y de la relación de C/N deseada, se debe especificar la cantidad máxima permisible en cada uno de los reactores empleados en el experimento. Para ello por motivos de facilidad en el momento de la rotación del elemento se opta por cargar los reactores a un 70 % de la capacidad total³⁷, en la cual la máxima capacidad es de aproximadamente 30 kg, siendo así 21 kg la capacidad al 70 % de carga de cada uno de los reactores (La densidad aparente de la mezcla de entrada es de 495,3 kg/m³, la cual se determina con la masa de mezcla necesaria para llenar una caneca, y dividiendo el volumen que representa la caneca). Una vez establecido ello se resuelven las ecuaciones para el caso de la pre-experimentación y de la experimentación dando los resultados representados en la Tabla 10. Para cargar cada reactor fue necesario triturar y

³⁶ RICHARD, Tom y TRAUTMANN, Nancy. Cornell Composting Science Engineering: C/N Ratio. [En línea]. Ithaca, NY: Cornell Waste Management Institute, Cornell University. 1996., 1 p. Disponible en http://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.htm.

³⁷ KALAMDHAD, Ajay. S y KAZMI, Absar. A. Rotary drum composting of different organic waste mixtures. En: Waste Management and Research. Marzo, 2009. vol. 27, no 2, p. 129-137.

macerar cada material de carga y el lodo, hasta llegar aproximadamente al diámetro de partícula establecido.

Tabla 10. Cantidades de lodo y agentes de carga empleados en la pre-experimentación y experimentación.

Característica Alimento	Pre-experimentación	Experimentación
Relación C/N	22,143	18,193
%Humedad	69,959	72,326
Cantidad Lodo (kg)	12	10
Cantidad Residuos Orgánicos Casino (kg)	7,463	7,631
Cantidad Aserrín (kg)	1,537	-
Cantidad Poda Césped (kg)	-	2,369

Imagen 7. Estado inicial de la mezcla en cada uno de los reactores.



3.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

3.5.1 Pre-experimentación. La pre-experimentación fue el primer intento de experimentación en el cual se empleó aserrín en vez de césped, la finalidad con la que se había propuesto el aserrín como agente de carga en vez del césped fue porque el aserrín tiene una mayor relación C/N, por lo cual aportaría considerables cantidades de carbono a la relación calculada por la mezcla, permitiendo así que esta hubiese alcanzado una mayor relación dentro de los niveles ideales. Durante la pre-experimentación se presentó un problema relacionado directamente con la no elevación de la temperatura debido a la probable baja actividad o inactividad microbiológica, al igual que a la difícil degradación de los complejos de carbono presentes en el aserrín. Por otro lado, durante el mes de enero del 2017 se experimentaron temperaturas ambientales por debajo de los 0 °C. Durante esta primera experimentación se logra poner a prueba la funcionalidad de los reactores, al igual que observar el comportamiento de las variables de proceso. Las

especificaciones de los factores al inicio del proceso de pre-experimentación y experimentación se ven resumidos en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros iniciales de la pre-experimentación y experimentación.

Parámetro al Inicio	Pre-Experimentación	Experimentación
C/N	22,143	18,193
Temperatura (°C)	22	22
pH	5,74	5,50
Humedad (%)	69,959	72,326
Frecuencia aireación (horas)	Cada 24	Cada 24
Tiempo Aireación (min)	5	5
Rotaciones por minuto (rpm)	4	4

Durante la pre-experimentación fue posible observar que el proceso no alcanzó las temperaturas esperadas en las cuales se pudiese apreciar una disminución en el volumen de la materia orgánica compostada, al igual que garantizara la sanitización de la misma. Con respecto al comportamiento del pH en cada uno de los reactores no alcanzó valores deseados al no haber un incremento hasta la alcalinidad, lo que puede significar un proceso lento o pobre a nivel biodegradativo. Un aspecto importante a resaltar es la no producción de lixiviados durante el proceso, lo cual revalida de cierta manera la latencia o lentitud del proceso.

En el proceso de la pre-experimentación se tomaron decisiones con la finalidad de activar el proceso y así poder alcanzar mejores niveles de temperatura y de pH. Tales modificaciones consistieron en variar el tiempo y la frecuencia de aireación, los cuales fueron disminuidos y aumentados respectivamente sin dar resultado positivo alguno. La posible explicación a tal fenómeno se puede dar al uso de un agente de carga con componentes muy complejos de degradar (lignina, hemicelulosa y celulosa)³⁸ por parte de los microorganismos al principio del proceso, lo cual nos demanda emplear un agente de carga diferente en la experimentación, uno con la capacidad activadora y de componentes sencillos como lo es el césped. Los datos obtenidos durante la pre-experimentación se encuentran en forma de gráficos en el Anexo F.

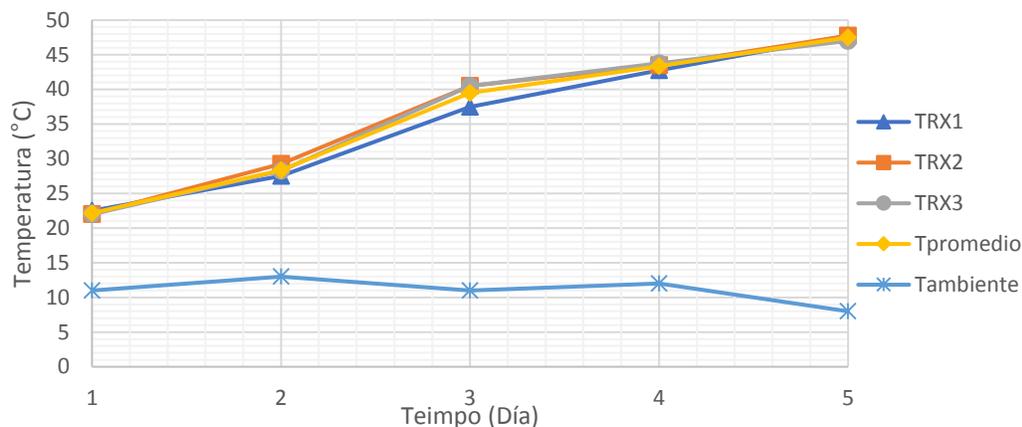
3.5.2 Resultados y análisis de resultados experimentación.

- **Temperatura:** como se explicó anteriormente, la temperatura es uno de los indicadores que mejor permite evidenciar el proceso de compostaje. Para todos los reactores se evidenció que las temperaturas más bajas en cada medición se reportaron en los extremos horizontales de los reactores y a la profundidad de 15 cm, al igual que se evidenció que la altura del material a compostar disminuyó

³⁸ LENNOX, J. A, et al. Comparative degradation of sawdust by microorganisms isolated from it. En: African journal of microbiology research. September, 2010. vol. 4, no. 17, p. 1804.

al quinto día debido a la biodegradación, por lo cual no se siguió registrando la temperatura a la profundidad de 15 cm durante el tiempo restante de la experimentación; la altura inicial del material en compostaje en promedio para los tres reactores es de 31,5 cm ($\pm 0,5$).

Gráfica 1. Perfil de temperaturas en los reactores a la profundidad de 15 cm.



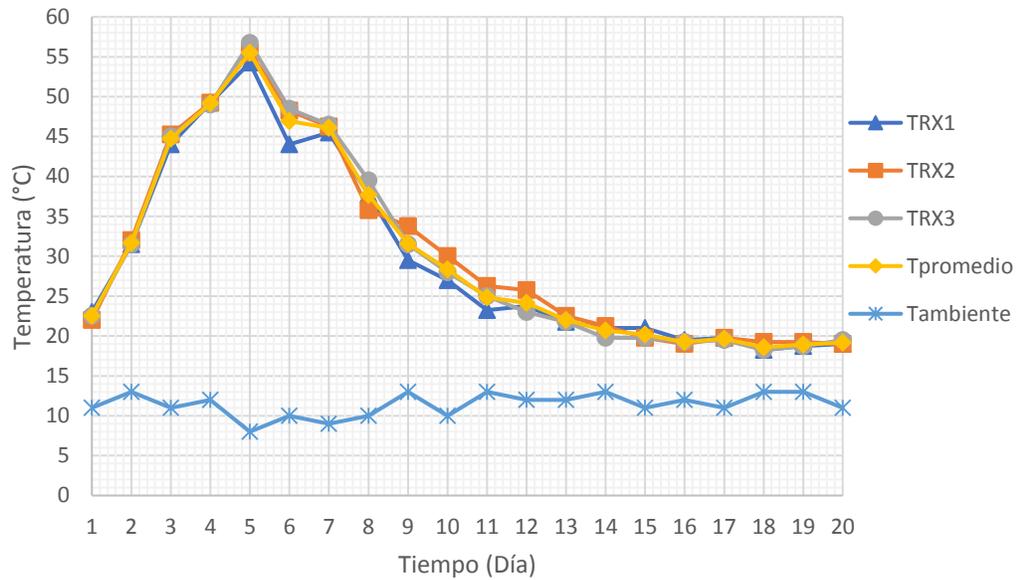
Para realizar un análisis más profundo del comportamiento de la temperatura se generaron unas gráficas para cada profundidad, en las cuales se encuentra el perfil del promedio de las temperaturas. En la Gráfica 1 se observa el comportamiento de la temperatura a una profundidad de 10 cm la cual solo representa la fase inicial del proceso. A esta profundidad la temperatura registrada después de instalados y cargados fue de 22 °C ($\pm 0,29$), tal temperatura superior a la del ambiente se presume debido a la cantidad de humedad contenida en las materias primas, al igual que el inicio de la actividad microbológica presente en los mismos materiales de carga. En los tres reactores se logra observar un comportamiento similar a esta profundidad, por otro lado, la máxima temperatura promedio que se registró entre los tres reactores a esa profundidad es de 48 °C ($\pm 0,43$) y hace parte de la fase termófila, la cual inició en el día 3.

Con respecto al inicio de la fase termófila, la cual se caracteriza por tener temperaturas mayores a 45 °C, se observó un incremento de temperatura similar durante tres días para todos los reactores Gráfica 2. Esta fase tuvo un tiempo de duración de 4 días, en la cual la máxima temperatura promedio fue de 62 °C ($\pm 0,90$) a una profundidad de 30 cm Grafica 2(b). A esta condición y un tiempo de duración mínimo de 30 minutos se da lugar a eliminación e inactivación de diferentes microorganismos patógenos, aunque hay que precisar que hay patógenos como el *streptococcus fecali* que requieren de una temperatura mayor a los 67 °C para lograr su inactivación³⁹. Se debe resaltar que las máximas temperaturas registradas en el

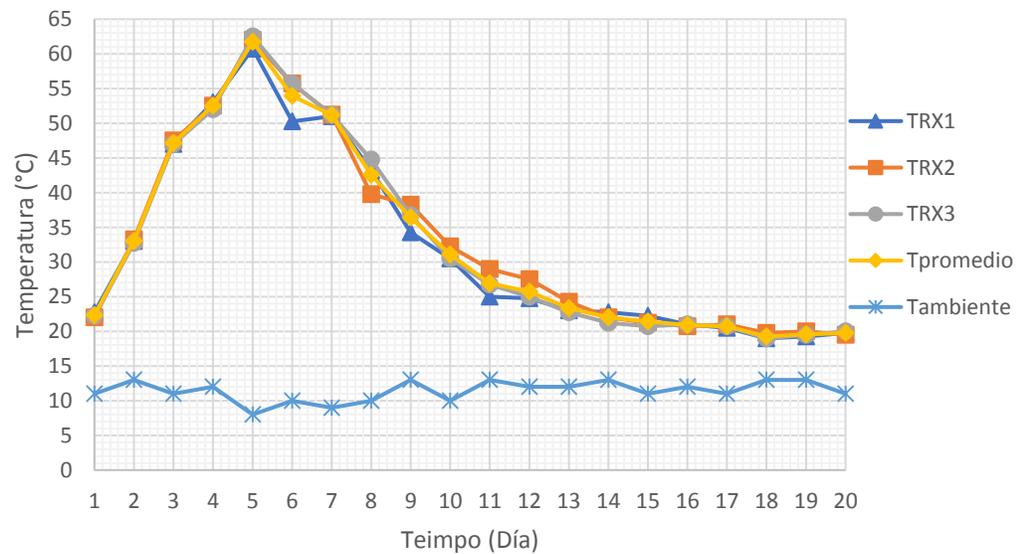
³⁹ IRANZO, María, et al. Characteristics of rice straw and sewage sludge as composting materials in Valencia (Spain). En: Bioresource technology. October, 2004. vol. 95, no. 1, p. 107-112.

día 5 para los tres reactores se comportaron de forma de inversa con respecto a la temperatura ambiente más baja (8 °C) del medio ambiente, lo cual indica que el aislamiento empleado fue el adecuado para mitigar las pérdidas de calor por las bajas temperaturas a las que se exponen los reactores en el lugar de la experimentación (sabana de Bogotá).

Gráfica 2. Perfil de temperaturas de los reactores a la profundidad de 20 cm (a) y 30 cm (b).



(a)



(b)

Durante esta etapa también se logró evidenciar la posible presencia de *actinomicetes*, debido a que al momento de tomar las muestras para pH se lograban observar unas formas filamentosas⁴⁰, como se evidencia en la Imagen 8.

Imagen 8. Interior de cada reactor con presunta presencia de *actinomicetes* en la fase termófila.



Luego de que la mayoría de los reactores alcanzaran su máximo de temperatura en el quinto día, el proceso comenzó su enfriamiento hasta dar fin a la etapa termófila en el día 8 como se observa en la Grafica 2, en la cual se registró una temperatura promedio de 38°C ($\pm 1,88$) a 20 cm de profundidad y de 43 °C ($\pm 2,53$) a los 30 cm de profundidad.

Al iniciar el proceso de maduración en el noveno día, las bacterias presentes comienzan la degradación de componentes más complejos, como lo son los anillos de la lignina⁴¹. Durante el proceso de maduración se logró observar que las características organolépticas de color y olor mejoraron, siendo éste de color marrón oscuro y de olor a tierra húmeda como se evidencia en la Imagen 9, tal olor es atribuido a las geosminas, cuya producción de acuerdo a Viacheslav y Mohammed (2017)⁴² es atribuida generalmente a diferentes microorganismos como lo son las cianobacterias, los actinomicetos, y algunos hongos. La temperatura en esta fase ya no presentaba variaciones considerables entre las que se registraban a diferentes alturas a partir del día 18, al final del proceso dentro del reactor se llegaría

⁴⁰ TUOMELA, M., et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. En: Bioresource technology. April, 2000. vol. 72, no. 2, p. 169-183.

⁴¹ Ibid., p. 173.

⁴² LIATO, Viacheslav y AİDER, Mohammed. Geosmin as a source of the earthy-musty smell in fruits, vegetables and water: Origins, impact on foods and water, and review of the removing techniques. En: Chemosphere. August, 2017.vol. 181, p. 9-18

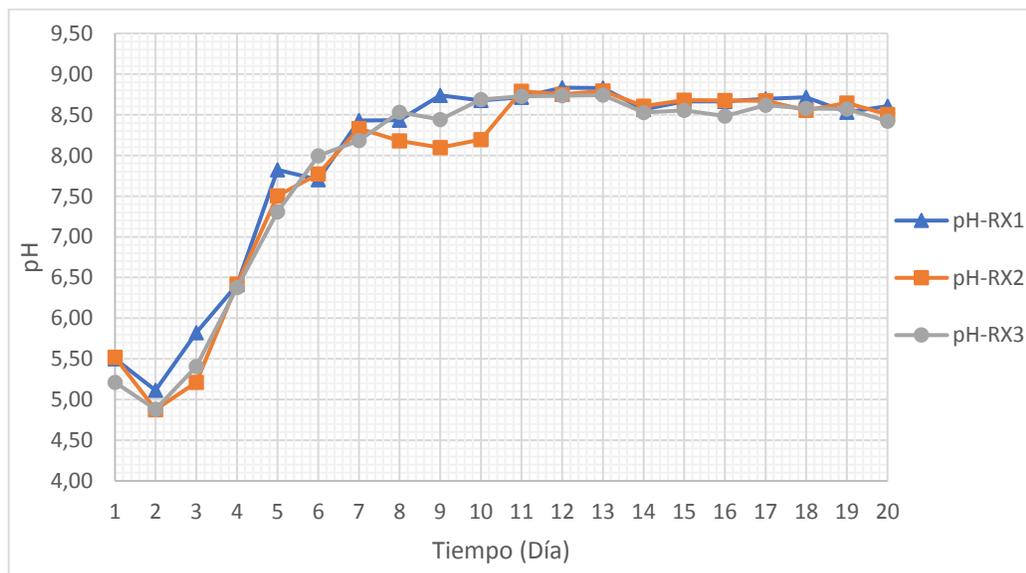
a una temperatura promedio de alrededor de los 19 °C ($\pm 0,29$) para la profundidad de 20 cm y de 20 °C ($\pm 0,25$) para la profundidad 30 cm.

Imagen 9. Interior de material final en cada uno de los reactores.



- **pH:** con respecto al variable pH, se tuvo en cuenta que ésta podía variar significativamente en cada uno de los diferentes puntos del reactor, por tal razón ésta fue medida después de cada agitación, al igual que para formar el extracto (mencionado en el protocolo de medición de la variable pH) las muestras se tomaron de tres puntos diferentes de cada uno de los reactores, siendo el promedio de los valores obtenidos como el valor global del pH en cada uno de los reactores.

Gráfica 3. Variación de pH en cada reactor durante los días del experimento.



En la Gráfica 3 se muestra la variación de pH de los tres reactores durante el tiempo de experimentación. En el inicio del experimento los diferentes reactores se encontraron en un pH ácido, debido a los aportes por parte de las materias primas, siendo el lodo con un pH ácido, como se observó previamente en su caracterización, el que más aporta al estar en mayor cantidad al momento de la mezcla. Los valores iniciales para el reactor 1, reactor 2, y reactor 3, son respectivamente 5,50 ($\pm 0,00$), 5,52 ($\pm 0,00$), y 5,21 ($\pm 0,00$). En el segundo día del experimento hubo un decrecimiento del pH a valores de 5,11 ($\pm 0,26$), 4,88 ($\pm 0,13$), y 4,88 ($\pm 0,16$) para los reactores 1, 2, y 3, respectivamente. Este decrecimiento de pH varios autores lo atribuyen a la producción de intermediarios ácidos y ácidos grasos por parte de los microorganismos presentes⁴³. Luego del decrecimiento del pH durante la fase mesófila, el proceso empezó a tener un incremento considerable a partir del tercer día, lo cual da inicio a la fase termófila; durante ésta fase la curva de temperatura alcanza los valores máximos para cada uno de los reactores en el día 5, mientras que el pH en ése momento se encuentra hasta el momento alcanzando un medio alcalino, debido a la presunta rápida descomposición de compuestos nitrogenados por parte de los microorganismos, y que a la vez producen amoníaco durante ése proceso biodegradativo⁴⁴.

Con respecto al máximo valor de pH para el reactor 1 se registró en el día 13 con un valor de 8,83 ($\pm 0,03$); para el reactor 2 su valor máximo se registró en el día 11 con un valor 8,79 ($\pm 0,03$), mientras que para el reactor 3 el máximo valor de pH se encontró en el día 13 con un valor de 8,74 ($\pm 0,05$). Durante la fase de finalización del compostaje se observa un leve decrecimiento del pH, en el caso del reactor 1 el compostaje finaliza en 8,61 ($\pm 0,04$), para el reactor 2 el pH final es de 8,50 ($\pm 0,06$), mientras que para el reactor 3 el pH al final es de 8,42 ($\pm 0,07$). Los valores al final del proceso se encuentran dentro del rango que exige la NTC5167 (2011)⁴⁵, el cual exige un valor mínimo de 4, y uno máximo de 9.

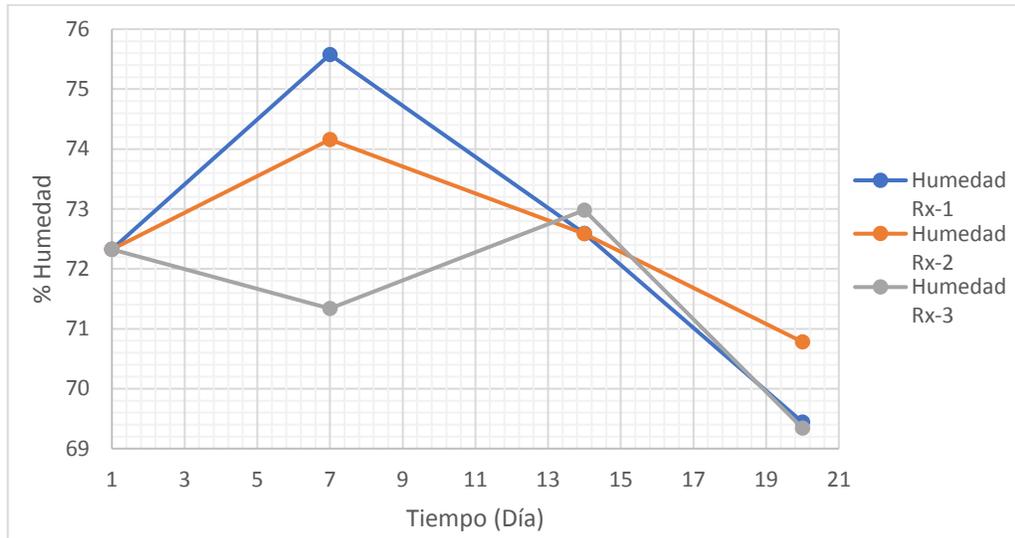
- **Humedad:** al principio del proceso la humedad fue fijada al cálculo correspondiente al balance realizado para determinar las cantidades iniciales del proceso, siendo esta de 72,326 %. Este valor de humedad se encuentra dentro del rango permitido para el desarrollo del proceso de compostaje evitando taponamientos en los poros del material de compostaje que pueden restringir el transporte de O₂.

⁴³ MENG, Liqiang, et al. Effects of sucrose amendment on ammonia assimilation during sewage sludge composting. En: BIORESOURCE TECHNOLOGY. 6.vol. 210, p. 160-166.

⁴⁴ Ibid., p. 163.

⁴⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Op. cit., p. 38.

Gráfica 4. Comportamiento de la humedad durante el tiempo de compostaje.



En los reactores 1 y 2 se observó el leve incremento de la humedad inicial de 72.3260 % a un 75.5763 % ($\pm 2,2346$) y un 74,1573 % ($\pm 2,2535$) respectivamente en el séptimo día de proceso. Tal comportamiento se puede atribuir a la posible adición de humedad por parte del aire presente en el ambiente que se empleó en la aireación, al igual que la retención de humedad por parte del material en proceso de compostaje. Con respecto al reactor 3 en el séptimo día se observa la disminución de la humedad hasta 71,3394 % ($\pm 2,5390$) la cual probablemente puede atribuirse a un error en el muestreo debido a que si se compara con los otros dos reactores hay una gran discrepancia en el comportamiento.

En el día catorce se observa un decrecimiento de la humedad hasta 72,5932 % ($\pm 0,6207$) para el reactor 1, y hasta 72,5854 % ($\pm 1,7654$) para el reactor 2, tal disminución se puede adjudicar a la evaporación al igual que hubo una producción de lixiviados en todos los reactores entre el día 7 y 14, lo cual significa pérdidas de humedad y de nutrientes por arrastre. Por el lado del reactor 3 se logra observar un leve incremento de la humedad hasta 72,9792 % ($\pm 1,5470$). Al finalizar el proceso en el día 20 los tres reactores tienen un comportamiento similar en el decrecimiento, llegando a tener valores de 69,44 % para el reactor 1, 70,78 % para el reactor 2, y 69,38 % para el reactor 3. Estos valores indican la necesidad de realizar un acondicionamiento al material por medio de un apantallamiento o secado debido a que la humedad requerida para abonos orgánicos de acuerdo a la NTC5167 (2011)⁴⁶ debe ser inferior o igual al 15 %.

- **Cenizas:** el porcentaje de cenizas es un factor que permite conocer el comportamiento de la biodegradación durante el proceso, al igual que también conocer la calidad agronómica del producto obtenido. Durante los procesos de

⁴⁶ Ibid., p. 4.

compostaje el descenso de materia orgánica es debido a la mineralización llevada a cabo por los microorganismos, y a la pérdida de carbono en forma anhídrida; durante dicho proceso parte de los componentes complejos como la lignina se degradan lentamente para ser transformados en compuestos húmicos. La biodegradabilidad de un proceso de compostaje es posible estimarse por medio de un balance de materia, en el cual la cantidad de cenizas se mantiene constante durante el proceso. Tal balance se puede expresar por medio de un coeficiente de biodegradabilidad (K_b) que involucra la cantidad inicial y final de cenizas o materia orgánica⁴⁷.

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

En la ecuación C_i y C_f son la concentración en porcentaje de cenizas al inicio y final del proceso de compostaje respectivamente. En la Tabla 12 se muestra el coeficiente de biodegradación para cada uno de los reactores.

Tabla 12. Coeficientes de biodegradación de cada reactor con las cantidades iniciales y finales de cenizas.

Reactor	% Cenizas al inicio (C_i)	% Cenizas al final (C_f)	% K_b
1	6,598	29,630	83,22
2	6,598	30,920	84,22
3	6,598	42,490	90,44

Con base a los coeficientes obtenidos para cada uno de los reactores se observa que la mayor biodegradación se alcanzó en el reactor 3 con un valor de 90,44 %, lo cual probablemente puede ser atribuido a una mayor velocidad de mineralización con respecto a los demás coeficientes de biodegradación obtenidos para los reactores 1 (83,22 %) y 2 (84,22 %). Con respecto al contenido de cenizas del producto al final del proceso, se puede observar que los valores obtenidos se encuentran dentro del valor exigido por la NTC5167 (2011)⁴⁸, la cual exige un porcentaje menor al 60 % para abonos orgánicos.

- **Sólidos Volátiles:** se le 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 e inorgánicos, los cuales pueden variar dependiendo del material que se esté compostando, de acuerdo con algunos autores como Smet et al., (1999)⁴⁹ y

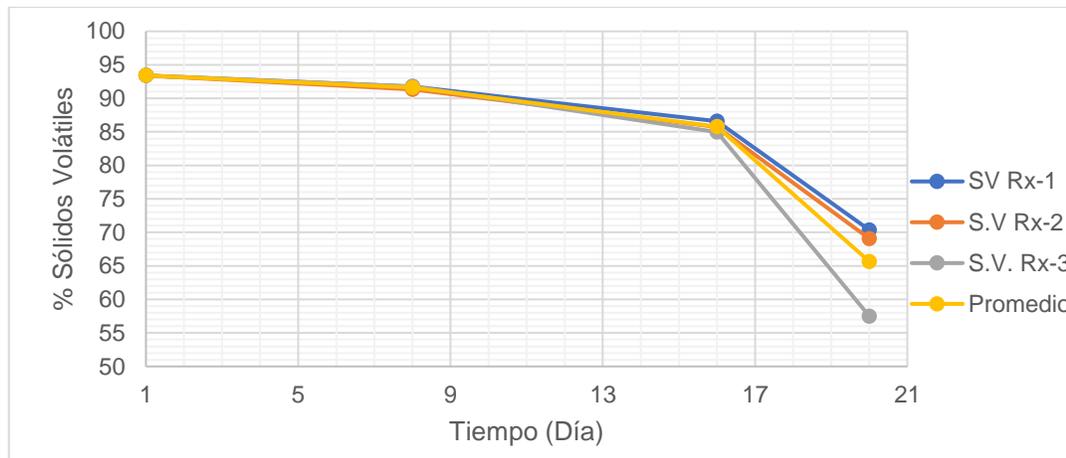
⁴⁷ HAUG, R.T. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis publishers. July 23 1993. Boca raton. Florida. ISBN: 9780873713733. 752 p.

⁴⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Op. cit., p. 4.

⁴⁹ SMET, E., LANGENHOVE, H, V. and BO, I, D. The emission of volatile compounds during the aerobic in the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. 1999., p. 1295-1303.

Pagans et al., (2006)⁵⁰ en los procesos aerobios los componentes orgánicos que predominan son ácidos orgánicos, cetonas, alcoholes, hidrocarburos, y esterés.

Gráfica 5. Comportamiento de los sólidos volátiles durante el tiempo de compostaje.



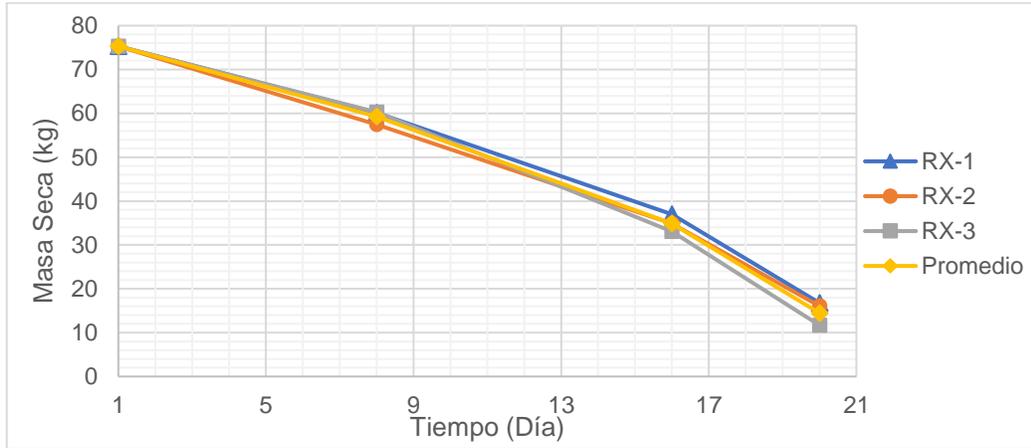
De acuerdo a la Gráfica 5 se observa que durante el proceso hay un decrecimiento de sólidos volátiles, lo cual es consistente con la biodegradación presentada por parte del proceso. Por otro lado, se observa que la mayor pérdida de sólidos volátiles ocurre al final del proceso, y no al inicio del proceso como ocurre comúnmente en los procesos llevados en reactores⁵¹, tal comportamiento se puede atribuir a la difícil degradación de la mayoría de los compuestos en la fase inicial. Al inicio del proceso los tres reactores tienen un valor de 93,4021 % ($\pm 0,1056$), el cual decrece a los ocho días de iniciado el proceso los reactores presentan leve decrecimiento, durante esta fase hubo malos olores en los reactores debido a la producción de diversos componentes generados a causa de las múltiples rutas metabólicas⁵². La disminución de sólidos volátiles es considerable a partir del día 16, en el cual los valores de los sólidos volátiles son de 86,5697 % ($\pm 0,0973$), 85,7472 % ($\pm 0,0761$), 84,9735 % ($\pm 0,3501$) para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente, esto es debido a que para nuestro caso la mayor degradación es en la parte final del proceso. Al finalizar el proceso de compostaje los reactores 1 y 2 alcanzan valores de 70,37 % ($\pm 0,0761$) y 69,08 % ($\pm 0,3501$), los cuales son similares y difieren del comportamiento que presenta al final el reactor 3 con un valor de 57,51 % ($\pm 0,1056$). Por último, es probable que la cantidad de sólidos volátiles siga disminuyendo en caso de que se quisiera aumentar el tiempo de retención en los reactores.

⁵⁰ KOMILIS, D. P., Ham, R K. and PARK, J. K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid waste. Water research. 2004., p. 1707-1714.

⁵¹ PAGANS, Estela, et al. Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. En: Journal of Hazardous materials. September, 2005. vol. 131, p. 181.

⁵² SMET, E., LANGENHOVE, H. V. and BO, I. D. The emission of volatile compounds during the aerobic in the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. 1999., p. 1295-1303.

Gráfica 6. Variación de la materia seca en los reactores.



Con respecto al comportamiento a la masa seca a través del proceso, se logra observar que es consistente al proceso, y es el reactor 3 el que presenta una disminución mayor con respecto a los demás reactores, los cuales presentan un comportamiento similar. Para el reactor 3 la materia seca al final del proceso es de 11,692 kg y con una disminución de materia del 84,5 % con respecto a la cantidad inicial, mientras que los reactores 1 y 2 finalizan el proceso con 16,767 kg (77,7 %) y 16,067 kg (78,7 %), respectivamente, y los cuales presentan menores desviaciones entre sí. Se debe precisar que para estos cálculos las cenizas totales (en masa seca) del proceso son constantes debido a que éstas no se volatilizan, y que la materia seca es calculada con la siguiente expresión:

$$m_{seca} = \frac{\text{Cenizas totales}}{\%Cenizas}$$

Parte de esa materia perdida en los reactores se puede atribuir a las salidas que presenta el reactor, como lo son las cantidades tomadas para el muestreo, y los lixiviados generados durante el proceso en cada reactor. Con respecto a los lixiviados se cuantificaron 98 mL para el reactor 1, 119 mL para el reactor 2, y 163 mL para el reactor 3; debido a la limitación de recursos económicos no se realiza la caracterización de los lixiviados, por lo tanto, se procede a la estimación de cenizas perdidas por medio de los lixiviados. Para ello se establece, con base a la caracterización realizada por Mohammad Nader (2003), que la cantidad de cenizas contenidas en los lixiviados es de 2050 mg/L⁵³, y que éstas son constituidas principalmente por calcio, potasio, magnesio y sodio. A continuación, se presentan los cálculos para las cenizas contenidas en los lixiviados de cada reactor.

⁵³ LUTFI AL-MEFLEH, Mohammed Nader. Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración. Madrid., 2003, 269 h. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Departamento de ingeniería civil., p. 18.

$$Cenizas_{lixiviados, RX1} = 0,119 L * 2050 \frac{mg}{L} = 243,95 mg$$

$$Cenizas_{lixiviados, RX2} = 0,098 L * 2050 \frac{mg}{L} = 200,9 mg$$

$$Cenizas_{lixiviados, RX3} = 0,163 L * 2050 \frac{mg}{L} = 334,15 mg$$

De acuerdo a las cantidades obtenidas se puede observar que las cantidades de cenizas perdidas en cada reactor son mínimas durante el proceso. Con respecto a las pérdidas de cenizas ocasionadas por los muestreos para laboratorio, se realizó el cálculo de cenizas a las cantidades retiradas en cada muestreo para cada reactor (Tabla 13); para este reactor las cenizas totales perdidas por muestreo son de 1,2747 kg lo cual es una cantidad insignificante, al igual que la masa seca total retirada durante el proceso (5,4624 kg).

Tabla 13. Perdida de cenizas por materia retirada para muestreo del reactor 1.

Día	Humedad (%)	Masa Muestra Húmeda (kg)	Masa Muestra Seca (kg)	Cenizas (%)	Cenizas (kg)
1	72,1100	0,15	0,5378	6,5979	0,0355
8	75,5763	0,15	0,6142	8,2577	0,0507
16	72,5932	0,15	0,5473	13,4303	0,0735
20	69,4400	1,15	3,7631	29,63	1,1150
Total	-	1,6	5,4624	-	1,2747

La disposición y descomposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios pueden constituir una considerable fuente generadora de gases como lo son el CH₄ y el CO₂⁵⁴, tal afirmación se respalda de acuerdo a lo expuesto por parte de Camargo, Y. y Velez, A. (2009)⁵⁵ los cuales determinan que un 47,5% de los gases generados corresponden a metano, mientras que un 30% es correspondiente al CO₂, estos gases son considerados como precursores del efecto invernadero de acuerdo a lo emitido por la EPA (Environmental Protection Agency)⁵⁶. De acuerdo a esta organización el potencial de aporte al calentamiento global del CO₂ para un periodo de 20 años en términos del índice GWP (Global Warming Potential) es

⁵⁴ CAMARGO, Y., y VÉLEZ, A. Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. II simposio iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, Colombia. 24 y 25 de septiembre de 2009. 12 p., p1.

⁵⁵ Ibid., p. 3.

⁵⁶ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas emission: Methane Emissions. [En línea]. United States: Washington D.C. 2017., 1p. Disponible en <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#methane>.

de 1, mientras que para el CH₄ con respecto al CO₂ es de 72, lo cual implica que el metano contribuye 72 veces más (en cantidades másicas) al efecto invernadero⁵⁷.

Para la estimación de CO₂ emitido durante el proceso de compostaje se asume que el carbono degradado durante el proceso se convierte en su totalidad en CO₂, y se desarrolla un balance de la cantidad de carbono que ingresa (m_{ci}) y sale (m_{cf}) del reactor en unidades másicas.

$$m_{ci} - m_{cf} = A$$

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

$$\frac{A}{12,0107 u} = B$$

Por último, se multiplica el valor obtenido (B) con el peso molecular del CO₂, obteniendo así la cantidad de CO₂ emitido en el proceso (Z) en unidades másicas.

$$B * (12 u + (16 u * 2)) = Z$$

$$B * 44 u = Z$$

En la Tabla 14 se presentan los resultados de las cantidades de CO₂ emitidos a la atmosfera durante el proceso de compostaje propuesto en cada uno de los reactores al igual que el promedio de éstos.

Tabla 14. Cantidades de carbono al inicio, final, y emitido como CO₂ para cada reactor, estimados para 20 años de residencia en la atmosfera.

Parámetro	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Promedio
C _{inicia} (kg)	7,13	7,13	7,13	7,13
C _{final} (kg)	4,99	5,03	3,84	4,62
CO ₂ emitido (kg)	7,83	7,70	12,05	9,19
C emitido en forma de CO ₂ (kg)	2,14	2,10	3,29	2,51

En la Tabla 15 se encuentra la información en el caso de realizar el vertimiento de la mezcla de residuos directamente en un relleno sanitario con un tiempo de duración de 20 años, para este caso se tomó un promedio entre los tres reactores con respecto a la cantidad de masa inicial y final del carbono.

⁵⁷ GLOBAL WARMING FORECAST. Methane and carbon dioxide global warming potential. [En línea] United States, 2017., 1p. Disponible en <http://www.global-warming-forecasts.com/methane-carbon-dioxide.php>.

Tabla 15. Estimación de cantidades de CO₂ y CH₄ de 20 años de residencia en la atmósfera en caso de hacer la disposición en un relleno sanitario.

Parámetro	Valor
Masa C _{inicial} (kg)	7,13
Masa C _{final} (kg)	4,62
Masa C _{emitido} (kg)	2,51
Moles C _{emitido} (kmol)	0,21
Moles CO ₂ emitidos (kmol) (30 % del C emitido)	0,06
Moles CH ₄ emitidos (kmol) (47,5 % del C emitido)	0,10
Masa CO ₂ emitido (kg)	2,76
Masa CH ₄ emitido (kg)	1,59

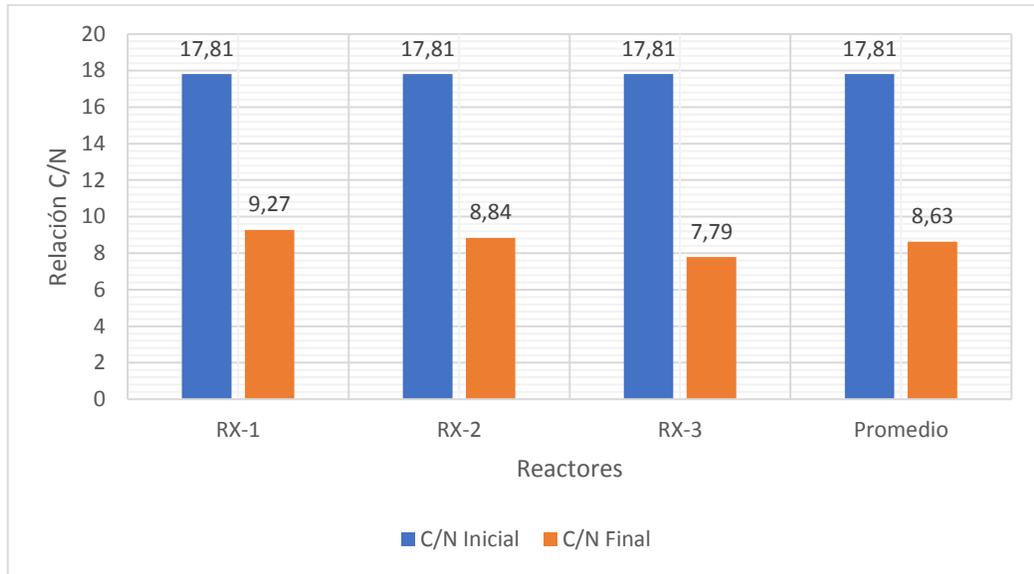
Como se observa en la Tabla 15 hay una mayor emisión de CO₂ con respecto al CH₄, pero si se tiene en cuenta el índice GWI que presenta una relación de 72:1 (CH₄:CO₂) para estos dos compuestos en una duración de 20 años del gas en la atmósfera, se logra establecer que por cada 1,59 kg de CH₄ emitidos equivalen al efecto invernadero que ocasionan 114,48 kg de CO₂. Con base en ello se puede afirmar que las cantidades de gases emitidas durante un proceso de compostaje tienen una menor incidencia sobre el efecto invernadero si se compara con las cantidades generadas cuando se disponen los residuos en un relleno sanitario.

- **Relación C/N:** los componentes involucrados en las materias empleadas en los procesos de compostajes se caracterizan por tener una cantidad considerable de macro constituyentes como lo son el carbono y el nitrógeno los que son esenciales en el crecimiento microbiano. El rango óptimo para un proceso de compostaje se encuentra entre 25 y 35⁵⁸, sin embargo, autores como Tiquia, S. M. (2005)⁵⁹ abren la posibilidad de operar en relaciones de C/N entre 15 y 40.

⁵⁸ MOHEE et al. Op cit., 93.

⁵⁹ TIQUIA, S. M. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. En: Journal of applied microbiology. July, 2005. vol. 99, no. 4, 2005., p. 816-828.

Gráfica 7. Relación de C/N al inicio y final en cada uno de los reactores.



En el experimento llevado a cabo, la relación que se propone por medio de los balances se encuentra dentro del rango permisible, y deja llevar a cabo la degradación. En la Gráfica 7 se observan los valores iniciales y finales de la relación C/N en cada uno de los reactores. Al finalizar un proceso de compostaje algunos autores consideran que la relación de C/N adecuada para un compost maduro de calidad debe encontrarse entre 10:1 y 15:1⁶⁰, con base en ello se puede observar que el compost obtenido en el reactor 1 es el que finaliza con el valor más cercano con una relación de 9,27, mientras que el reactor 2 y 3 se encuentran ya mucho más alejados de este valor con relaciones de 8,84 y 7,79 respectivamente. Para realizar un análisis más detallado del carbono y nitrógeno al final del proceso se genera la Tabla 16.

Tabla 16. Carbono total y nitrógeno total al final del proceso de cada reactor.

Parámetro	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	NTC 5167
Carbono Total Final (%Base seca)	32,43	31,83	26,50	>15
Nitrógeno Total Final (%Base seca)	3,50	3,60	3,40	>1

De acuerdo a la anterior tabla se puede decir que la cantidad de nitrógeno total para cada reactor al final del proceso es cercana entre sí, y cumplen con lo exigido por la NTC5167(2011)⁶¹. Con respecto al carbono total oxidable, se observa que la

⁶⁰ SZTERN, Daniel y A. PRAVIA, Miguel. Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos. Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Unidad de desarrollo municipal. Uruguay. 69 p., p. 52.

⁶¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Op. cit., p. 4.

diferencia que presentan los reactores 1 y 2 con el reactor 3 es probablemente debido a la velocidad de biodegradación observada.

Tabla 17. Cantidades de C y N al inicio, final del proceso, con las pérdidas respectivas.

Parámetro	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Masa final (kg)	15,40	15,80	14,50
C _{inicia} (kg)	7,131	7,131	7,131
N _{inicial} (kg)	0,693	0,693	0,693
C _{final} (kg)	4,994	5,029	3,843
N _{final} (kg)	0,539	0,569	0,493
C _{perdido} (kg)	2,137	2,102	3,288
N _{perdido} (kg)	0,154	0,124	0,200
%N _{perdido}	22,2	17,9	28,9
%C _{perdido}	30,0	29,5	46,1

Para la determinación de la cantidad de nitrógeno y carbono perdido se restaron las cantidades de cada uno al inicio y final del proceso. Para las cantidades finales de cada uno se requirió de la masa final del material compostado en cada reactor, al igual que los porcentajes de carbono y nitrógeno presentes en cada uno.

Como se observa en la Tabla 17, al comparar las pérdidas de carbono en los tres reactores se observa que el reactor 3 presenta la mayor cantidad de carbono perdido con 3,288 kg (46,1 %), esa mayor cantidad perdida con respecto a los otros dos reactores es probablemente debido a una mayor biodegradación. Para los reactores 1 y 2 presentaron una pérdida de carbono similar con 2,137 kg (30,0 %) y 2,102 kg (29,5 %) respectivamente, tal comportamiento es acorde a los coeficientes de biodegradación calculados para cada reactor. Las pérdidas de carbono pueden ser atribuidas probablemente a la volatilización del carbono en formas de CO₂ y CH₄, como se mencionó previamente en las emisiones de CO₂.

Con respecto a las pérdidas de nitrógeno, el reactor 3 presenta las mayores pérdidas con 0,200 kg (28,9 %), mientras que por parte de los otros dos reactores las pérdidas son más parecidas con 0,154 kg (22,2 %) para el reactor 1 y de 0,124 kg (17,9 %) para el reactor 2; esta pérdida de nitrógeno puede ser asociado también a la biodegradación ocurrida en cada uno de los reactores. Se debe precisar que estas pérdidas de nitrógeno ocurren por la volatilización de componentes como el NO₂ y NH₃; tales pérdidas de nitrógeno significan que la relación C/N con la que se inicia el proceso es aún baja y se da a causa al exceso de nitrógeno en el sistema⁶².

⁶² EKLIND, Y. y KIRCHMANN, H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses. En: Bioresource technology. September, 2000. vol. 74, no. 2, p. 125-133.

- **Microorganismos Patógenos:** uno de los factores más importantes al momento de evaluar la calidad de un abono orgánico es la presencia de microorganismos patógenos en el material compostado, la no eliminación de tales microorganismos puede representar riesgos biológicos y químicos para el medio ambiente y los organismos que lo componen⁶³. En la Tabla 18 se muestran las temperaturas y el tiempo necesario para lograr la eliminación de los patógenos más relevantes en el compostaje. De acuerdo a las máximas temperaturas registradas en el experimento, las cuales superaron en al menos dos días los 55 °C, se puede plantear la hipótesis de la eliminación de la mayoría de agentes patógenos. Con la finalidad de corroborar dicha hipótesis se realiza un análisis microbiológico de coliformes fecales, coliformes totales, *E. Coli*, y microorganismos aerobios por parte del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Tabla 18. Temperaturas y tiempos necesarios para la eliminación de patógenos más comunes.

Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55	1 hora
	65	15-20 minutos
<i>Escherichia coli</i>	55	1 hora
	65	15-20 minutos
<i>Brucella abortus</i>	55	1 hora
	62	3 minutos
<i>Parvovirus bovino</i>	55	1 hora
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	55	3 días

Fuente. PILAR ROMÁN et al. Manual de compostaje del agricultor. 2013., p 33.

De los resultados obtenidos en el análisis microbiológico, los cuales se consignan en la Tabla 19, se observa un aspecto negativo a nivel de calidad del producto obtenido, tal aspecto es la presencia de *E. Coli* en el producto de los tres reactores, esta presencia significa la no salubridad del producto. Con ésta problemática es necesario remitirse a los análisis microbiológicos de los lodos, en los cuales se puede observar la ausencia de *E. Coli*, lo cual nos indicaría que la procedencia de dicho microorganismo puede ser por parte de alguno de los agentes de carga empleados.

⁶³ DÉPORTES, Isabelle; BENOIT-GUYOD, Jean-Louis y ZMIROU, Denis. Hazard to Man and the Environment Posed by the use of Urban Waste Compost: A Review. En: Science of the total environment. November, 1995. vol. 172, p, 197-222.

Tabla 19. Cantidades de patógenos presentes a la salida de cada reactor.

Parámetro	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	NTC 5167
Coliformes Totales (UFC/g)	1x10 ⁵	1x10 ³	1x10 ³	1x10 ³
Coliformes Fecales (UFC/g)	1x10 ⁵	1x10 ⁴	1x10 ³	1x10 ³
E. Coli (UFC/g)	1x10 ⁴	3x10 ³	2x10 ²	Ausente
Mesófilos Aerobios (UFC/g)	1x10 ⁸	6,8x10 ⁶	1x10 ⁶	-

Los coliformes totales es la denominación a un grupo de bacterias cuya principal característica es ser Gram negativas, y son capaces a condiciones favorables fermentar la lactosa, y su cuantificación es un indicador de presencia de E. Coli y Salmonella spp. Con respecto a los coliforme fecales son aquellos microorganismos presentes en los tractos intestinales de mamíferos y aves; la propagación de dichos microorganismos se da debido a la disposición de heces humanas y de animales. De acuerdo a los niveles exigidos para coliformes totales y fecales por parte de la NTC5167 (2011)⁶⁴, la cual exige una presencia menor a 1000 UFC/g para coliformes totales y fecales, se logra evidenciar que el único producto obtenido que cumple al límite los requerimientos es el del reactor 3. Por el lado del reactor 1 es el que presenta los peores valores al ser éstos cinco veces mayor al límite permitido, mientras que por el lado del reactor 2 cumple parcialmente la norma con el tener un valor de coliformes totales iguales a 1x10³ UFC/g, pero excediendo por 1000 UFC/g de coliformes fecales el valor exigido por la norma.

El no haber logrado la correcta sanitización del producto obtenido en cada uno de los reactores puede significar la insuficiencia del tiempo de duración de la temperatura necesaria para la eliminación de los patógenos. Dicho lo anterior es necesario la implementación de una etapa de acondicionamiento del material saliente de los reactores con el fin de lograr la calidad exigida. Al momento de realizar un escalamiento a una unidad piloto es probable que al aumentar el volumen de compostaje incrementa la cantidad de calor generado, lo cual implicaría unas mayores temperaturas que permitan una adecuada sanitización del material. Por otro lado, en caso de no llegar a sanitizarse el material será necesario la implementación de un proceso de apantallamiento o de pasteurización, los cuales alcanzan altas temperaturas por un tiempo deseado; la implementación de alguna de esas etapas puede significar el incremento de costos en el proceso.

⁶⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Op. cit., p. 9.

4. ESCALAMIENTO DEL PROCESO

En este capítulo se desarrolla el método empleado para escalamiento del reactor horizontal rotatorio, al igual que la especificación de equipos adicionales para la adecuación del material de carga y del post-tratamiento del producto obtenido. El escalamiento del reactor horizontal se realiza por medio de un método que emplea un 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 realizado y desarrollado diferentes modelos matemáticos para los sistemas de compostaje, dichos modelos son regidos por la cinética y termodinámica del proceso de compostaje⁶⁵. La mayoría de estos modelos⁶⁶ requieren de parámetros como lo son la concentración de O₂, o de CO₂, los cuales para este proyecto no fueron determinados al no contar con los equipos o instrumentos necesarios. Por otra parte, también hay modelos físicos como el que emplean Behrentz E. y Giraldo E. (1999)⁶⁷, en el cual se utiliza una unidad 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:Volumen⁶⁸. Para llevar a cabo el escalamiento del proceso por el modelo a desarrollar, Behrentz sugiere asumir la misma humedad de la escala laboratorio en la del sistema piloto, debido a que es una variable que se puede controlar de manera fácil 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 de dimensiones en un sistema de aireación forzada. Se debe aclarar que éste escalamiento se realiza para un reactor rotatorio que se encuentra en reposo.

El modelo empleado por Behrentz y Giraldo se centra en plantear una relación directa entre la variable temperatura y la relación de Área:Volumen. Dicha relación se logra al establecer 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.

⁶⁵ HAUG. Op. cit., p 95.

⁶⁶ MASON, I. G. Mathematical modelling of the composting process: A review. En: Waste management. vol. 26, no. 1, p. 3-21.

⁶⁷ BEHRENTZ, E. y GIRALDO, E., Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. En: Revista Colombiana De Biotecnología, Colombia. 1999. v.2 fasc.2 p.51 – 59.

⁶⁸ HOGAN, J. A. MILLER, F. C, FINSTEIN, M. S. Physical modeling of composting ecosystem. En: Applied and Environmental Microbiology. vol. 55, no. 5, p. 1082-1092.

$$B_G = \frac{A}{V} = \frac{T_d}{T_g} = \frac{-k*F*\Delta T}{H_{rx}*\lambda*V*S} \quad (1)$$

Este factor de escalamiento es adimensional y debe mantenerse entre el modelo a escala y el de laboratorio, con el fin de asegurar un comportamiento similar de la temperatura para ambos sistemas. Para la tasa de calor generado (2) se tiene la siguiente expresión:

$$T_g = H_{rx} * \lambda * V * S \quad (2)$$

Donde:

H_{rx} : Entalpía 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 (3) de calor de manera conductiva a través de la superficie de la figura geométrica del equipo empleado a escala laboratorio y a escala piloto.

$$T_d = q = -k * F * \Delta T \quad (3)$$

Donde:

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

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

F : Factor 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.

$$(B_G)_{prototipo} = (B_G)_{modelo} \quad (4)$$

$$\left(\frac{k*F*\Delta T}{H_{rx}*\lambda*V*S} \right)_{prototipo} = \left(\frac{k*F*\Delta T}{H_{rx}*\lambda*V*S} \right)_{modelo} \quad (5)$$

De la anterior expresión se pueden realizar las simplificaciones de algunos términos que no se encuentran en función de la escala geométrica y pueden ser constantes en la escala laboratorio y piloto. El primer término que se simplifica es el de la entalpía de reacción la cual no depende del cambio geométrico que ésta sufra, por otro lado, también se realiza la simplificación de la tasa de reacción y de la concentración del sustrato debido a que éstas condiciones no cambian en la escala piloto o laboratorio al encontrarse a la misma temperatura⁶⁹. Una vez realizadas las simplificaciones la expresión (5) queda de la siguiente manera.

$$\left(\frac{k*F*\Delta T}{V}\right)_{prototipo} = \left(\frac{k*F*\Delta T}{V}\right)_{modelo} \quad (6)$$

La expresión obtenida (6) permite realizar el escalamiento, en la cual el volumen reaccionante y el factor de forma cambian considerablemente. Es entonces necesario mantener la igualdad y compensar dichos cambios manipulando la conductividad térmica del material que contiene la mezcla, y el gradiente de temperatura alrededor del volumen reaccionante. Con respecto al factor de forma de la unidad experimental es de forma cilíndrica, y es representada con la expresión (7), hay que precisar la geometría para la unidad piloto es representada de la misma manera.

$$F = \frac{2*\pi*H}{Ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (7)$$

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

Luego de un análisis de situación real y de aplicación a escala laboratorio, Behrentz encuentra que hay una relación entre el volumen y la geometría de la pila a modelar y el gradiente de temperatura que debe mantenerse en la unidad de compostaje empleada en el laboratorio⁷⁰. Luego de aplicar e debido despeje a la ecuación (6) y al implementar el factor de forma cilíndrico se obtiene la expresión (8) que va a permitir la variación de las dimensiones a las que se desea modelar la unidad piloto, el subíndice P se refiere a la unidad piloto y el subíndice L se refiere a la unidad laboratorio.

$$\Delta T_L = \frac{k_P*F_P*\Delta T_P*V_L}{k_L*F_L*V_P} \quad (8)$$

El volumen reaccionante (V_L) empleado durante la escala laboratorio fue de 0,042 m³, mientras que la conductividad térmica (k_L) para el poliuretano es de 0,039

⁶⁹ BEHRENTZ, E. Op. cit., p 53.

⁷⁰ BEHRENTZ, E. Op. cit., p 54.

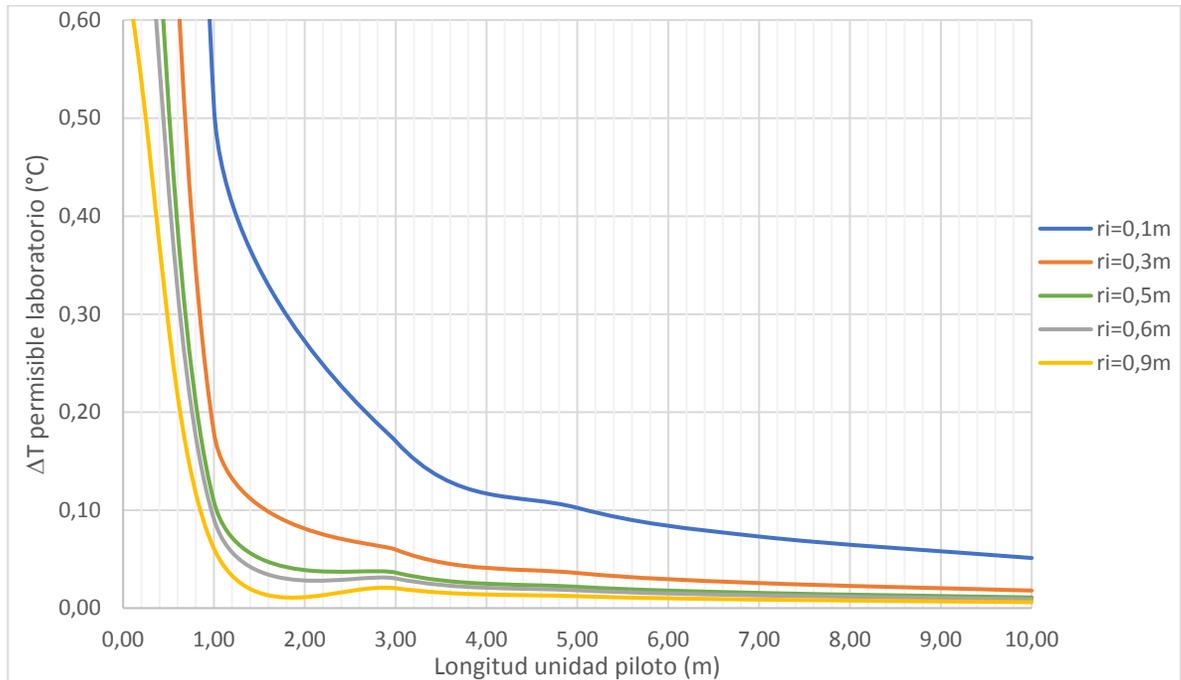
$W/m \cdot k$ ⁷¹. Para la escala piloto se quiere que el diferencial de temperatura (ΔT_P) entre el límite del material de compostaje y la pared interna del reactor sea la menor con el fin de simular la menor pérdida de calor posible, por lo tanto, se va a tomar un valor de 1 °C cuando el reactor alcance el máximo de temperatura. Con respecto al material que se va a emplear se selecciona acero inoxidable ($k_P=19 W/m \cdot K$) para el cuerpo del reactor, lo cual va a prevenir daños en el equipo por corrosión generada a causa de diferentes componentes generados, el espesor de la pared es de 0,02 m (5/8")⁷².

Con respecto al volumen reaccionante a la escala piloto se determina por medio de relaciones entre las cantidades de lodo y materiales de cargas obtenidas en el Capítulo 2 de Diagnóstico, para ello se establece que el “reactivo límite” es la poda de césped al obtenerse en menor cantidad de acuerdo a la Tabla 4 (Cantidades másicas y volumétricas de cada materia prima producidas en un mes). La relación por cada kilogramo de poda de césped adicionado de 4,22 kg de lodo, y 3,22 kg de residuos orgánicos; obteniendo así una cantidad de procesamiento cercana a los 2650 kg, lo cual corresponde aproximadamente 5,3 m³ (V_P) a compostar en el reactor (Calculado con una densidad aparente de 495,3 kg/m³). Si quisiéramos tratar la cantidad total del lodo se deberá adquirir la cantidad faltante de césped con vendedores o fincas locales, al igual que 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 en el control y tratamiento de los gases generados por el proceso, por seguridad para una mayor escala se toma la decisión de llenar a solo un 70 % de la capacidad del reactor debido a los gases generados, lo cual se aplica de la misma manera para el reactor de escala piloto; a consecuencia a esta consideración el reactor debe ser de aproximadamente de 6,9 m³ de capacidad.

⁷¹ MASON, I. G. y MILKE, M. W. Op. cit., p 488.

⁷² XACT SYSTEMS. In vessel composter: The Bioreactor [En línea]. Canada: Ontario. 2017., 1p. Disponible en <http://xactsystemscomposting.com/bioreactor>.

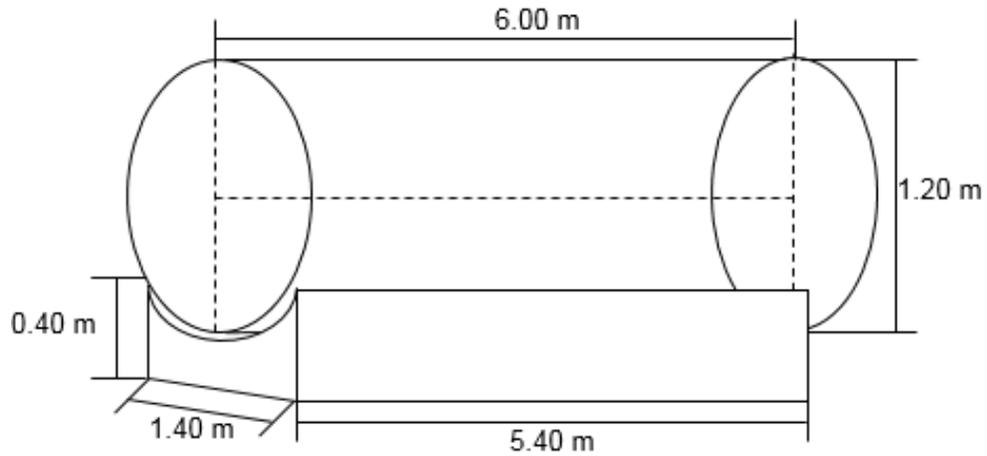
Gráfica 8. Relación entre dimensiones escala piloto con respecto al diferencial de temperatura permisible a escala laboratorio.



Con la ayuda de la Gráfica 8 se puede hacer la selección de las dimensiones del reactor de la escala piloto, para ello es necesario identificar la curva que presenta un comportamiento asintótico a unas dimensiones requeridas. Para este caso el radio interno equivalente a 0,1 m no alcanza la condición, mientras que el radio interno equivalente a 0,3 alcanza la condición a una longitud de 8 m dando así un volumen de 2,26 m³, el cual es mucho menor al que se requiere como mínimo. Para un valor de 0,5 m de radio la condición se alcanza aproximadamente a una longitud de 6,5 m, lo cual representaría un volumen de 5,10 m³, el cual sigue siendo pequeño. Con respecto al radio 0,6 m se alcanza la condición permisible a una longitud de 6 m, obteniendo así un volumen de 6,8 m³, el cual se aproxima a la cantidad de volumen a compostar, pero a la vez no es suficiente al faltar un 0,1 m³. Tomando por último al radio equivalente a 0,9 m, éste alcanza la condición a 4 m de longitud y da un volumen de 10,2 m³, el cual ya es muy grande para la cantidad de material trabajar.

De acuerdo a lo analizado previamente se concluye que el reactor más cercano al requerimiento necesario debe ser de unas dimensiones equivalentes a 0,6 m de radio interno y 6 m de longitud, y un volumen de 6,8 m³. Esto sólo es posible si somos permisibles y cambiamos la capacidad extra considerada para los gases generados del reactor de un 30 % a un 25 %, dando así un volumen necesario de 6,6 m³, tal aproximación no incide ni hace parte del fundamento base del escalamiento, sólo afecta la tolerancia que se había establecido para los gases.

Figura 5. Esquema del reactor a escala piloto (medidas en metros).



Con respecto a la base de rotación se va a emplear acero inoxidable, y sus dimensiones van a ser de 1,40 m de ancho, 0,40 m de alto, y 5,40 m de largo (Figura 6). En el interior de la base va a estar instalado el sistema de rotación por medio de ruedas de fricción y el cual va a involucrar dos motores de 5 hp cada uno, debido a que la potencia requerida es de 8,8 hp para mover la masa contenida y tener 4 revoluciones por minuto; los cálculos para la potencia requerida son presentados a continuación:

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

$$W = m * a$$

$$W = 2650 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 25970 \text{ N}$$

Posteriormente se determina la velocidad de rotación partiendo del requerimiento de 4 rpm.

$$\vartheta = 4 \text{ rpm} * \frac{2 * \pi}{60 \text{ seg}} * 0,6 \text{ m} = 0,2513 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

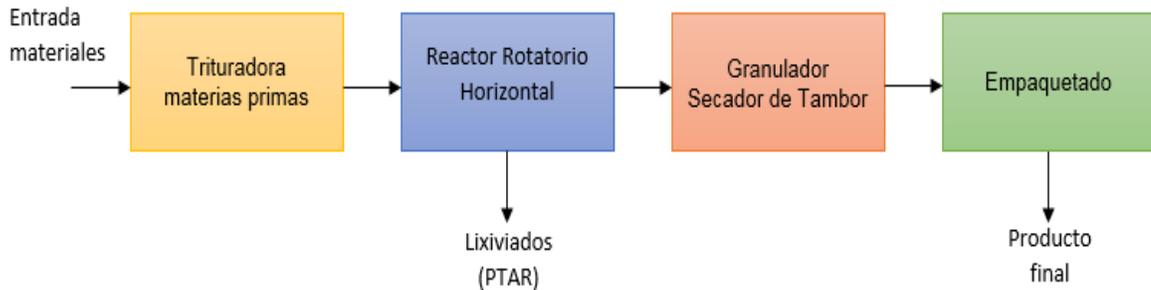
$$P = F * \vartheta$$

$$P = 25970 \text{ N} * 0,2513 \text{ m/s} = 6527 \text{ J/s} \cong 8,8 \text{ hp}$$

Por último, los lixiviados son evacuados por medio de una válvula de 1/2 pulgada ubicada en uno de los extremos del reactor cuando el reactor se encuentra en reposo, similar a la forma de los reactores laboratorio. Para lograr el desplazamiento

de los lixiviados se opta por una pequeña inclinación de ocho grados (8°) del cuerpo del reactor con respecto al eje horizontal. Éstos lixiviados son recirculados, junto a los lixiviados obtenidos de los lechos de secado, hacia la PTAR con el fin de que sean tratados debidamente.

Figura 6. Diagrama en bloques del proceso propuesto.



4.2 UNIDADES COMPLEMENTARIAS

En el proceso propuesto se requieren unidades auxiliares 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 un tamaño de partícula específico; el granulador secador del 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 homogeneizar el tamaño de partícula. De los equipos mencionados la institución cuenta con una trituradora, la cual no sería contemplada en el análisis de costos de inversión. A continuación, se realiza la descripción técnica de cada una de estas unidades complementarias.

Figura 7. Ficha técnica triturador de residuos orgánicos, césped y lodo.

FICHA TÉCNICA - TRITURADOR DE RESIDUOS ORGÁNICOS, CÉSPED, Y LODO	
	<p>Marca: Trapp. Modelo: TR200 Nombre: Triturador de ramas, troncos y residuos orgánicos. Producción: 500-1000 kg/h Potencia Motor Eléctrico: 12 kW Tamaño de Partícula Entrada: 150-200 mm Tamaño de Partícula salida: 0.5-35mm</p>

Figura 8. Ficha técnica secador material saliente del reactor.

FICHA TÉCNICA – GRANULADOR SECADOR DE TAMBOR	
	<p>Marca: Changzhou Chuangke Drying Granulating Equipment Co., Ltd. Modelo: $\Phi 600$ mm x 6000 mm Nombre: Secador de tambor Producción: 500-1500 kg/h Potencia Motor Eléctrico: 35 kW Precio 4000 USD</p>

5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROCESO

En el presente capítulo se realiza un análisis de los costos requeridos para llevar a cabo la implementación y desarrollo del proceso de compostaje aerobio 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 20. Precios del mercado local para 10 kg de abono orgánico sólido.

Marca	Precio (COP)
Forza Tierra Bona	23.900
Anasac	24.990
Jarditec	26.990

Para nuestro proceso se obtienen alrededor de 2120 kg de abono al mes, los cuales se propone venderlos en una presentación de 10 kg. Basándonos en los precios ofrecidos en el mercado, al igual que el precio promedio del mercado \$25.293 COP, se propone establecer un precio de venta asequible de \$19.000 COP.

Los clientes potenciales del producto serían fincas y huertas locales ubicadas en las cercanías del colegio y del municipio de Chía. Por otro lado, también parte del producido puede ser empleado en la huerta del colegio y en jardinería del mismo, lo cual significa la eliminación de este insumo como costo del colegio.

5.1 COSTOS MANO DE OBRA

Los costos de mano de obra están relacionados directamente a el número de personas involucradas en el desarrollo del proceso. El valor de mano de obra se establece por medio del salario mínimo mensual vigente en Colombia para el año 2017. Con respecto al número de personas necesarias para la operación del proyecto se establece un número de 2, de las cuales 1 es un operario de tiempo completo, y 1 es el ingeniero de producción el cual va a ser contratado por medio de un contrato de prestación de servicios, en el cual el ingeniero se compromete a realizar una revisión mensual del proceso. La jornada laboral para el operario es de 8 horas diarias durante los 5 días de la semana de lunes a viernes.

Tabla 21. Costos anuales de mano de obra.

Costo mano de obra Operario		
Concepto	Valor (COP)/mes	Costo anual
Sueldo	\$ 737.717,00	\$ 8.852.604,00
Auxilio de transporte	\$ 83.140,00	\$ 997.680,00
Prima	\$ 61.476,42	\$ 737.717,00
Vacaciones	\$ 30.738,21	\$ 368.858,50
Cesantías	\$ 61.476,42	\$ 737.717,00
Interés Cesantías	\$ 7.377,17	\$ 88.526,04
Total	\$ 981.925,21	\$ 11.783.102,54
Costo mano de obra Ingeniero		
Concepto	Valor (COP)/mes	Costo anual
Sueldo	\$ 1.000.000,00	\$ 12.000.000,00
Auxilio de transporte	\$ -	\$ -
Prima	\$ -	\$ -
Vacaciones	\$ -	\$ -
Cesantías	\$ -	\$ -
Interés Cesantías	\$ -	\$ -
Total	\$ 1.000.000,00	\$ 12.000.000,00

5.2 COSTOS EQUIPOS Y MATERIALES

Los costos relacionados a la inversión de equipos y materiales adicionales son los de mayor consideración, y son determinados de acuerdo a la cantidad necesaria de cada equipo. La descripción de cada equipo está establecida en el Capítulo 4 de Escalamiento del Proceso.

Tabla 22. Costos de inversión para el proyecto.

Inversión			
Equipos	Costo Unitario (COP)	Cantidad	Valor Total
Motor Eléctrico 5HP	\$ 110.000	2	\$ 220.000
Reactor	\$ 90.000.000	1	\$ 90.000.000
Granulador Secador	\$ 10.000.000	1	\$ 10.000.000
Medidores variables	\$ 5.000.000	1	\$ 5.000.000
Inversión Total			\$ 105.220.000

5.3 COSTOS DIRECTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos directos de producción son aquellos atribuidos a la inversión de materias primas para llevar a cabo el proceso, como en el proceso las materias primas son residuos obtenidos dentro de la institución no se tienen en cuenta. Se reportan unos costos de energía eléctrica, y agua por consumo básico o de ser necesarios en el proceso.

Tabla 23. Costos directos de producción.

Costos directos de producción			
Concepto	Unidad	Valor Unidad (COP)	Total/Mes (COP)
Lodo	kg	\$ -	\$ -
Césped	kg	\$ -	\$ -
Residuo Casino	kg	\$ -	\$ -
Agua	m ³	\$ 4.264,68	\$ 21.323,40
Energía Eléctrica	kWh	\$ 451,54	\$ 13.546,20
Total			\$ 34.869,60

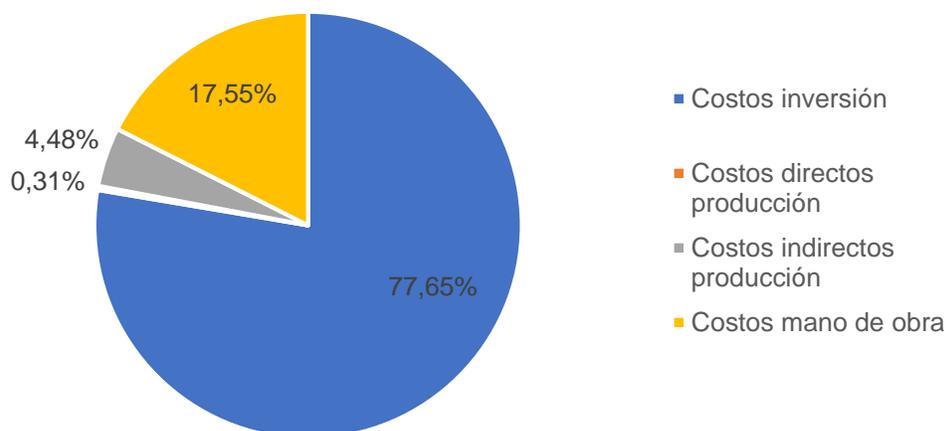
5.4 COSTOS INDIRECTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos indirectos de producción son asociados a aquellos implementos y servicios para la puesta en marcha del proceso y que a la vez no intervienen directamente en la producción, por tal motivo estos costos se van a considerar fijos. La maquinaria empleada requiere únicamente de energía eléctrica por lo tanto no es necesario el uso de gas, por lo tanto, no hay necesidad de red de gas natural.

Tabla 24. Costos insumos indirectos de producción.

Cotos indirectos de producción				
Servicio	Valor unitario (COP)	Total/día	Total/mes	Costo anual (COP)
Agua	\$ 4.264,86	\$ 4.264,86	\$ 42.648,60	\$ 511.783,20
Energía Eléctrica	\$ 451,54	\$ 11.453,99	\$ 343.619,66	\$ 4.123.435,88
Implementos Seguridad	\$ 120.000,00	-	\$ 120.000,00	\$ 1.440.000,00
Total costo año				\$ 6.075.219,08

Gráfica 9. Distribución de costos del proyecto en el año.



Los costos en la totalidad del proyecto son de unos \$135.496.757 COP, de los cuales el que mayor de los cuales de acuerdo a la Gráfica 9 los costos de inversión son los que mayor aportan al ser un 77,65 % de los costos totales, mientras que los costos directos de producción son los de menor medida con un 0,31 % al no requerir la compra de las materias primas debido a que éstas son residuos obtenidos en la institución.

5.5 FLUJO DE CAJA

Se realiza un balance anual del proyecto para cada año proyectado, con la finalidad de observar el flujo de caja para un periodo de 10 años. En cada año se realizó un incremento del 4,11 % para los servicios públicos, tal alza del se realizó con respecto al promedio del IPC presentado al final durante los últimos 5 años (2012- 2,44 %; 2013- 1,94 %; 2014- 3,66 %; 2015- 6,77 %; 2016- 5,75 %) ⁷³, con base en dicha alza también se decide incrementar un 5 % del precio de venta del producto a comercializar. Para al salario del operador se realiza el mismo procedimiento con base a los incrementos realizados durante los últimos 5 años (2012- 5,80 %; 2013- 4,02 %; 2014- 4,50 %; 2015- 4,60 %; 2016- 7,00 %), dando así un alza del 5,2 % al año.

Con respecto a los costos de inversión en equipos, se propone realizar una financiación con alguna entidad financiera, la cual se encargará de financiar un

⁷³ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Índice de precios al consumidor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2017., 1p. Disponible en <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc#documentos-de-referencia-ipc>.

\$50.000.000 COP por 5 años con una tasa de interés efectiva anual del 12,46%⁷⁴, mientras que los otros \$55.220.000 COP restantes los aportaría el colegio de contado.

Tabla 25. Balance anual proyectado para 10 años el proyecto.

Balance Anual					
Concepto	1 año	2 año	3 año	4 año	5 año
Ingresos (COP)	\$ 48.336.000	\$ 50.752.800	\$ 53.290.440	\$ 55.954.962	\$ 58.752.710
Utilidad Neta (COP)	\$ 5.227.734	\$ 5.928.177	\$ 6.667.264	\$ 7.447.070	\$ 8.269.776
Depreciación Equipos (COP)	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000
Amortización Crédito Equipos (COP)	\$ 7.796.960	\$ 8.769.436	\$ 9.863.203	\$ 11.093.390	\$ 12.477.012
Flujo de Caja	\$ 7.952.773	\$ 7.680.741	\$ 7.326.062	\$ 6.875.680	\$ 6.314.765

Balance Anual					
Concepto	6 año	7 año	8 año	9 año	10 año
Ingresos (COP)	\$ 61.690.346	\$ 64.774.863	\$ 68.013.606	\$ 71.414.286	\$ 74.985.001
Utilidad Neta (COP)	\$ 9.137.680	\$ 10.053.198	\$ 11.018.876	\$ 12.037.392	\$ 13.111.563
Depreciación Equipos (COP)	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000
Amortización Crédito Equipos (COP)	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo de Caja	\$ 19.659.680	\$ 20.575.198	\$ 21.540.876	\$ 22.559.392	\$ 23.633.563

Una vez realizado el balance se observa que el proyecto presenta pequeñas ganancias en los primeros 5 años, en los cuales se termina de pagar el crédito bancario de los \$50.000.000 COP que se adquirió para la compra de equipos. Por otro lado, es a partir del año 6 en el cual se empieza a observar un mayor margen de ganancia del proyecto, y el cual aumenta con el pasar de los años hasta llegar al año 10.

Con la finalidad de determinar la viabilidad del proyecto, se va a emplear el modelo de evaluación de VPN (Valor Presente Neto), el cual consiste en determinar si la inversión realizada al inicio va a ser maximizada en un largo plazo, para este caso en 10 años. Si el valor presente neto es positivo, el proyecto tiene una viabilidad económica y se obtendrá una riqueza equivalente al valor obtenido. Si es negativo el proyecto es inviable debido a que la empresa disminuirá su capital con respecto al monto obtenido. En el caso de que el valor obtenido sea de 0, no habrá ni aumento ni disminución en el capital de la empresa. La expresión para el cálculo del VPN se muestra a continuación:

⁷⁴ EL TIEMPO. Crédito a empresas, el que más ha subido tras alza del emisor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2016., 1p. Disponible en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16604233>.

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

Donde:

VPN: Valor presente neto

I: Inversión inicial

Pn: Flujo neto anual

TMAR: Tasa mínima activa de retorno

La tasa mínima activa de retorno (TMAR) es aquella que permitirá determinar si la inversión realizada va a representar ganancias; ésta involucra la tasa de inflación que presenta el país y la tasa de retorno esperada. Esta última puede ser estimada por medio de un estudio de mercado relacionado al producto o servicio a ofrecer (abono orgánico), en nuestro caso se establece por medio de un estudio de factibilidad de una empresa de abonos orgánicos en Colombia Novoa. J. (2010)⁷⁵. Es de menester aclarar que la tasa de retorno debe ser mayor a la de la inflación debido a que de esta forma se estaría garantizando una ganancia para la inversión a realizar. La expresión empleada para el cálculo se muestra a continuación:

$$TMAR = \left(((1 + FI) \times (1 + TR)) - 1 \right) * 100$$

Donde:

FI: Inflación año 2016 (5,75 %)

TR= Tasa retorno (10 %)

Para una inflación del 5,75 % y una tasa de retorno establecida en el 10 %, se obtiene que la TMAR es de un 14,89 %, lo que tentativamente significa que va a haber una ganancia por parte de la inversión a realizar.

Una vez especificados los datos para la evaluación, se obtiene un VPN equivalente a \$5.250.171 para un periodo de 10 años, lo cual implica que el proyecto probablemente aumentará en ese valor el capital del colegio. Hay que precisar que la financiación establecida para el crédito puede variar dependiendo de la entidad financiera.

⁷⁵ NOVOA, Jennifer. Factibilidad para la creación de una empresa productora de abono orgánico en el municipio de San Martín, Cesar. Trabajo de grado Profesional en Producción Agroindustrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Instituto de proyección regional y educación distancia, 2010. 177 p.

6. CONCLUSIONES

- Se realizó el diagnóstico de los lodos en el Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, dicha caracterización muestra un lodo con una relación de C/N igual a 5,40, una humedad de 79,81, y un pH de 5,70. Estas características obtenidas del lodo son similares a otros lodos tratados por medio de un compostaje aerobio por parte de Rodríguez. L. (2012) y de Doublet, J., et. al (2010). De acuerdo a la caracterización microbiológica realizada el lodo tiene una ventaja al no presentar *E.Coli*, y al contener una cantidad considerable de aerobios mesófilos (1×10^6 UFC/g).
- Se seleccionó un proceso de compostaje aerobio por medio de reactores horizontales con volteo a través de una matriz de selección que evalúa las diferentes alternativas de compostaje expuestas con base en los criterios de salubridad, eficiencia, costos, y tiempo. Dicho proceso es el que obtiene el mayor puntaje de la matriz (42) y se adecúa a las necesidades planteadas por parte de la institución. Autores como Nayak y Kalamdhad (2015) y Singh y Kalamdhad (2014) recomiendan este tipo de proceso por reactores debido a que se puede obtener un compost química y biológicamente estable entre 15 y 20 días, y sin necesitar de grandes extensiones de área; aunque el proceso es uno de los que mayores costos puede presentar.
- Se realizó el desarrollo experimental del proceso con tres reactores horizontales a escala laboratorio, a los cuales se les hizo el seguimiento de las variables de temperatura, pH, humedad, y cenizas. El reactor 3 es el que presenta mejor comportamiento al mostrar un coeficiente de biodegradación de 90,44 %. El producto obtenido en los tres reactores cumple con los parámetros físico-químicos exigidos por la NTC5167 para abonos orgánicos sólidos, pero requiere de un acondicionamiento al haber presentado altos niveles de humedad (69,85 %) y presencia de patógenos (*E. Coli* y *Coliformes totales*).
- Se evidenció que los gases generados durante el proceso de compostaje aerobio de la mezcla lodo, residuos orgánicos y poda de césped, tiene una menor incidencia en cuanto a la generación de gases de efecto invernadero en comparación con los emitidos en un relleno sanitario. Reduciendo así el impacto ambiental ocasionado por parte de los gases de efecto invernadero.
- Se escaló una unidad piloto por medio del método empleado por Behrentz, E. y Giraldo, E., el cual aplica la similaridad geométrica y cinemática, y se fundamenta en la tasa de flujo de calor generada por el volumen compostado y la tasa de flujo de calor disipada en el área de la configuración geométrica empleada. La unidad que alcanza la condición térmica que simula el mismo comportamiento es de 0,6 m de radio interno y 6 m de longitud, dando así una escala piloto de $6,8 \text{ m}^3$ de capacidad; la cual satisface la necesidad de la cantidad establecida ($6,6 \text{ m}^3$).

- Se realizó un análisis de los costos necesarios para el desarrollo del proceso a una escala piloto. Los costos necesarios para el primer año son de alrededor de \$135.496.757, de los cuales la inversión en maquinaria es el que realiza el mayor aporte con un total de \$105.220.000 COP. Los costos directos de producción son bajos al no requerir de la compra de materias primas, debido a que éstas son residuos orgánicos generados dentro de la institución.
- Se realizó un estudio financiero para la implementación de la propuesta a escala piloto, en la cual la inversión inicial para poner en marcha el proyecto es de \$ 105.220.000 COP, de los cuales \$50.000.000 COP son financiados por medio de una entidad financiera y amortizados en 5 años, mientras que la cantidad restante es aportada por parte del colegio. El proyecto es viable al haber presentado un VPN proyectado a 10 años equivalente a \$5.350.171 COP.

7. RECOMENDACIONES

- Para aumentar la fiabilidad de los resultados obtenidos en la caracterización de los lodos, se sugiere realizar nuevamente la caracterización durante diferentes puntos del proceso de secado.
- Implementar filtros de gases que permitan el manejo y tratamiento de los gases generados durante el proceso.
- Proponer nuevas configuraciones de operación del reactor horizontal, como implementar calor o controlar la temperatura del proceso en toda la unidad de compostaje.
- Desarrollar la experimentación variando alguno de los factores principales del proceso como lo son la relación C/N, tiempo de retención, aireación, frecuencia de aireación, entre otros, con el fin de determinar los valores óptimos de operación.
- Aumentar el tiempo de retención del material a compostar en el reactor con el fin de observar si se consigue una mayor biodegradación del material, al igual que realizar un seguimiento más minucioso de las cenizas durante el proceso.
- Estudiar y monitorear el comportamiento del contenido de carbono, nitrógeno, cenizas y O₂ en las diferentes fases del proceso, con el fin de desarrollar un estudio más detallado de la cinética del proceso, al igual que identificar los efectos que pueden ocasionar los cambios de estas variables en el producto.
- Evaluar la calidad agronómica del abono orgánico producido sobre los cultivos de la huerta y jardines del colegio.
- Realizar el escalamiento del reactor en el caso que se implemente la incidencia del volteo en el diseño; al igual que analizar el caso de que el reactor opere en modalidad continua.
- Desarrollar un plan de producción y almacenamiento del abono orgánico que se produce, al igual que de los materiales de carga.

BIBLIOGRAFÍA

ALI, Muntjeer.; KAZMI, Absar Ahmad. y AHMED, Naseem. Study on effects of temperature, moisture and pH in degradation and degradation kinetics of aldrin, endosulfan, lindane pesticides during full-scale continuous rotary drum composting. En: Chemosphere. May, 2014. vol. 102.

BEHRENTZ, Eduardo. y GIRALDO, Eugenio., Modelación a escala del proceso de compostaje aerobio en pila estática con aireación forzada. En: Revista Colombiana De Biotecnología, Colombia. 1999. v.2 fasc.2.

CHEN, Yong. Sewage Sludge Aerobic Composting Technology Research Progress. En: Aasri procedia. 2012, vol. 1.

DAYS WELL SPENT. How to build a compost tumbler? [En línea]. United States: Margaret. 2015., 1 p. Disponible en <http://www.dayswellspent.com/how-to-build-a-compost-tumbler/#more-2663>.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Índice de precios al consumidor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2017., 1p. Disponible en <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc#documentos-de-referencia-ipc>.

DÉPORTES, Isabelle; BENOIT-GUYOD, Jean-Louis y ZMIROU, Denis. Hazard to Man and the Environment Posed by the use of Urban Waste Compost: A Review. En: Science of the total environment. November, 1995. vol. 172.

DÍAZ, Luis Felipe.; BERTOLDI, Marco. and BIDLINGMAIR, Werner. Compost Science and Technology. En: Elsevier Science. Jul 29. 2011.

DOUBLET, Jérémy, et al. Sewage sludge composting: Influence of initial mixtures on organic matter evolution and N availability in the final composts. En: Waste management. April, 2010. vol. 30, no. 10.

EKLIND, Ylva. y KIRCHMANN, Holger. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses. En: Bioresource technology. September, 2000. vol. 74, no. 2.

EL TIEMPO. Crédito a empresas, el que más ha subido tras alza del emisor [En línea]. Bogotá D.C., Colombia. 2016., 1p. Disponible en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16604233>.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas emission: Methane Emissions. [En línea]. United States: Washington D.C. 2017., 1p. Disponible en <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#methane>.

EPSTEIN, Eliot. Industrial composting: environmental engineering and facilities management. New York, USA. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. 2011.

GLOBAL WARMING FORECAST. Methane and carbon dioxide global warming potential. [En línea] United States, 2017., 1p. Disponible en <http://www.global-warming-forecasts.com/methane-carbon-dioxide.php>.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, Jorge, et al. Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. En: Journal of environmental management. January, 2015, vol. 147, no. 1.

HAUG, Roger Tim. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis publishers. July 23 1993. Boca raton. Florida. ISBN: 9780873713733.

HIMANEN, Marina y HÄNNINEN, Kari. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges -Effect of feedstock on the process and quality of compost. En: Bioresource technology. February, 2011. vol. 102, no. 3.

HOGAN, John. MILLER, Frederick, FINSTEIN, Melvin. Physical modeling of composting ecosystem. En: Applied and Environmental Microbiology. vol. 55, no. 5.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Determinación de humedad, cenizas y materia orgánica. NTC 1886. Bogotá D.C.: El instituto, 1983.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C., Colombia. 23 de julio de 2008. Ed. 2008-08-04. I.C.S.: 01.140.20.

_____. Guía para el muestreo de lodos de aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas. NTC 5667-13. Bogotá D.C.: El instituto, 1998.

_____. Guía técnica colombiana (GTC53-7). Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos. Bogotá D.C., Colombia. 26 de abril de 2006. Ed. 2006-05-09. I.C.S.: 13.030.10.

_____. Método de ensayo para determinar el contenido de agua (Humedad) de suelos y rocas, con base en la masa. NTC 1495. Bogotá D.C.: El instituto, 2013.

_____. Productos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. NTC 5167. Bogotá D. C.: El Instituto, 2011.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C., Colombia. 23 de julio de 2008. Ed. 2008-08-04. I.C.S.: 01.140.20.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C., Colombia. 28 de octubre de 1998. Ed. 1998-10-28. I.C.S.: 01.140.20.

IRANZO, Maria, et al. Characteristics of rice straw and sewage sludge as composting materials in Valencia (Spain). En: Bioresource technology. October, 2004, vol. 95, no. 1.

KABBASHI, Nassereldeen. Sewage sludge composting simulation as carbon/nitrogen concentration change. En: Journal of environmental sciences. November, 2011. vol. 23, no. 11.

KALAMDHAD, Ajai S, et al. Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. En: Bioresource technology. December, 2009. vol. 100, no. 24.

KALAMDHAD, Ajai S. y KAZMI, Absar Ahmad. Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. En: CHEMOSPHERE. March, 2009. vol. 74, no. 10.

KALAMDHAD, Ajai S. PASHA, Muneer y KAZMI, Absar Ahmad. Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter. En: Resources, conservation and recycling. March, 2008. vol. 52, no. 5.

KIELY, Gerard. Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. España. McGraw Hill, 1993. V3. ISBN: 9788448120399.

KOMILIS, Dimitris. Ham, Robert. and PARK, Jae. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid waste. Water research. 2004.

LENNOX, Josiah Asime, et al. Comparative degradation of sawdust by microorganisms isolated from it. En: African journal of microbiology research. September, 2010. vol. 4, no. 17.

LI, Zhentong, et al. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. En: Chemosphere. October, 2013. vol. 93, no. 7.

LIATO, Viacheslav y AIDER, Mohammed. Geosmin as a source of the earthy-musty smell in fruits, vegetables and water: Origins, impact on foods and water, and review of the removing techniques. En: Chemosphere. August, 2017. vol. 181.

LLORET, Eva, et al. Two-stage mesophilic anaerobic-thermophilic digestion for sludge sanitation to obtain advanced treated sludge. En: Chemical engineering journal. August, 2013. vol. 230.

- LUTFI AL-MEFLEH, Mohammed Nader. Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración. Madrid., 2003, 269 h. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. Departamento de ingeniería civil.
- MASON, Ian G. Mathematical modelling of the composting process: A review. En: Waste management. 2006. vol. 26, no. 1.
- MASON, Ian G. y MILKE, Mark W. Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. En: Waste management. March, 2005. vol. 25, no. 5.
- MENG, Liqiang, et al. Effects of sucrose amendment on ammonia assimilation during sewage sludge composting. En: Bioresource technology. June, 2016. vol. 210.
- MOHEE, Romeela y MUDHOO, Ackmez. Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. En: Powder technology. July, 2005. vol. 155, no. 1.
- NAYAK, Ashish Kumar. y KALAMDHAD, Ajai S. Sewage sludge composting in a rotary drum reactor: stability and kinetic analysis. En: International journal of recycling of organic waste in agriculture. December, 2015. vol. 4, no. 4.
- NEGRO, María José, VILLA. F, and AIBAR Joaquín. Producción y gestión del compost. CIEMAT, DGA. Zaragoza, España. 2002.
- NIWAGABA, Charles B., et al. Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. En: Waste management. February, 2009. vol. 29, no. 2.
- NOVOA, Jennifer. Factibilidad para la creación de una empresa productora de abono orgánico en el municipio de San Martín, Cesar. Trabajo de grado Profesional en Producción Agroindustrial. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad Instituto de proyección regional y educación distancia, 2010.
- OFICINA DE PLANEAMIENTO Y PRESUPUESTO UNIDAD DE DESARROLLO MUNICIPAL. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimiento. Febrero, 1999. Uruguay.
- ONWOSI, Chukwudi., et al. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. En: Journal of environmental management. April, 2017. vol. 190.
- PAGANS, Estela, et al. Emission of volatile organic compounds from composting of different solid wastes: Abatement by biofiltration. En: Journal of Hazardous materials. September, 2005. vol. 131.

PROIETTI, Primo, et al. Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. En: Journal of cleaner production. November, 2016. vol. 137.

RASAPOOR, Mazdak. NASRABADI, Touraj. KAMALI, Mehdi. and HOVEIDI, Hassan. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. 2009. Waste Management 29.

RICHARD, Tom y TRAUTMANN, Nancy. Cornell Composting Science Engineering: C/N Ratio. [En línea]. Ithaca, NY: Cornell Waste Management Institute, Cornell University. 1996., 1 p. Disponible en http://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.htm.

RODRÍGUEZ, Luis., et al. Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage. En: Journal of environmental management. December, 2012. vol. 112.

SINGH, Jiwan. y KALAMDHAD, Ajai S. Effect of carbide sludge (lime) on bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of water hyacinth. En: Chemical speciation and bioavailability. 2014. vol. 26, no. 2.

SMET, Erik., LANGENHOVE, Herman Van. and BO, Inge De. The emission of volatile compounds during the aerobic in the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. 1999.

SUDHARSAN VARMA. y KALAMDHAD, Ajai S. Evolution of chemical and biological characterization during thermophilic composting of vegetable waste using rotary drum composter. En: International journal of environmental science and technology. June, 2015. vol. 12, no. 6.

SZTERN, Daniel. y PRAVIA, Miguel. Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos. Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Unidad de desarrollo municipal. Uruguay.

TIQUIA, Sonia M. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. En: Journal of applied microbiology. July, 2005. vol. 99, no. 4.

TUOMELA, Marja., et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. En: Bioresource technology. April, 2000. vol. 72, no. 2.

WU, Shaohua, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting. En: International Biodeterioration & biodegradation. April, 2017. vol. 119.

XACT SYSTEMS. In vessel composter: The Bioreactor [En línea]. Canada: Ontario. 2017., 1p. Disponible en <http://xactsystemscomposting.com/bioreactor>.

YAÑEZ, Remedios.; ALONSO, José Luis. y DÍAZ, Manuel Jesús. Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. En: Bioresource technology. December, 2009. vol. 100, no. 23.

YUAN, Jing, et al. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting. En: Waste management. October, 2016. vol. 56.

ZAHRA EL OUAQOUDI, Fatima, et al. Evaluation of lignocelullose compost stability and maturity using spectroscopic (FTIR) and thermal (TGA/TDA) analysis. En: Ecological engineering. February, 2015. vol. 75.

ZULARISAM, Abd Wahid., et al. Production of biofertilizer from vermicomposting process of municipal sewage sludge. En: Journal of applied sciences. 2010. vol. 10, no. 7.

ANEXOS

ANEXO A.

MUESTRAS ROTULADAS Y EMPACADAS DE LOS AGENTES DE CARGA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Imagen 10. Muestras de residuos orgánicos de casino (a) y de poda de césped (b).



(a)



(b)

ANEXO B.

FORMATOS DE ENTREGA DE RESULTADOS DE LABORATORIOS



**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. 001375	FECHA SOLICITUD : 24-nov-16	FECHA IMPRESIÓN : 12-dic-16
Cliente Nombre: ALVARO JOSE RODRIGUEZ MEDINA Dirección: CL 63 30-34 Municipio: BOGOTA Teléfono: 3003833334 Fax: E-Mail: alvaro.rodriguez@estudiantes.uamerica.edu.co/al		Finca Nombre: COLEGIO ROCHESTER Municipio: CHIA Departamento: CUNDINAMARCA
No. Muestra: 108		Solicitante: ALVARO JOSE RODRIGUEZ MEDINA Material: No Especificado Identificación: MUESTRA No. 1 LODO

Variable	Unidades	Base Húmeda	Base Seca	Óptimos Base Seca	kg/Ton Base Húmeda
Porcentaje de Humedad	%	79.81			
Densidad Aparente	g*cm ⁻³	0.82			
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC):	cmol+ * kg ⁻¹	26.34	130.46		
Carbono Orgánico	%	5.34	26.47		
Materia Orgánica	%	11.60	57.43		
Genizas	%		42.57		
Relación Carbono:Nitrógeno	p:p	5.40	5.40		
pH (Reacción de Acidez):	-logH+	5.70			
Conductividad Eléctrica	dS/m	10.25			
Nitrógeno Total (N):	%	0.99	4.90		10
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄):	%	0.037	0.183		0.37
Nitrógeno Nitrato (NO ₃):	%	0.028	0.137		0.28
Fósforo (P):	%	0.59	2.90		5.86
Potasio (K):	%	0.02	0.12		0.23
Calcio (Ca):	%	0.04	0.19		0.39
Magnesio (Mg):	%	0.001	0.007		0.01
Azufre (S):	%	0.32	1.60		3.23
Sodio (Na):	%	0.076	0.377		0.76

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

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Muestras No. 126-01

Fecha recepción de muestra: 24 de noviembre de 2016

Fecha de entrega resultados: 25 de noviembre de 2016

Cliente: Álvaro José Rodríguez Medina

Descripción de la muestra: Muestra de Compost

Análisis solicitado: Recuento de Coliformes Totales, Fecales, *E. coli* y Aerobios Mesófilos.

Consecutivo: 126-01 Muestra de Compost

RESULTADOS

Tabla 1. Recuento de Coliformes Totales, Fecales, *E. coli* y Aerobios Mesófilos.

Datos de la Muestra	Interpretación (UFC/g)
Muestra de agua 126-01	<p>Coliformes Totales: 2×10^3</p> <p>Coliformes Fecales: 2×10^2</p> <p><i>E. coli</i>: 0</p> <p>Aerobios Mesófilos: 1×10^6</p>

Cordialmente,



PAOLA ANDREA ESCALLON
Microbióloga Industrial
Laboratorio Microbiología Agrícola y Ambiental

Nota: En caso de reclamación o sugerencias dirigirse a Luz Stella Fuentes email: luz.fuentes@utadeo.edu.co

REPORTE DE RESULTADOS

Recibido:	13/02/2017	Solicitante:	Alvaro José Rodríguez Medina	Cultivo:	Varios
Entregado:	No reporta	Dirección:	Calle 63 No. 30 - 34	Departamento:	Cundinamarca
No. recibo:	Recibo 739	Teléfono:	30038333354	Municipio:	Chia

RESULTADOS

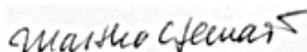
No. Lab.	Tipo	N	C	% Humedad a 70°C
		%		
C55	Residuos orgánicos	1,87	46,0	n.s.
F139		2,55	41,1	59,6

n.s.: No solicitado.

Los resultados de este reporte corresponden únicamente a las muestras suministradas por el usuario y analizadas en el laboratorio.

MÉTODOS DE ANÁLISIS

%C (carbono total): Análisis elemental. N (nitrógeno total): Análisis elemental. %Humedad a 70°C: Secado a 70°C.



MARTHA CECILIA HENAO TORO
Directora laboratorio

RECUERDE: El plan de fertilización es más eficiente y productivo si Usted consulta con el profesional de Asistencia Técnica de su localidad.

ANEXO C.

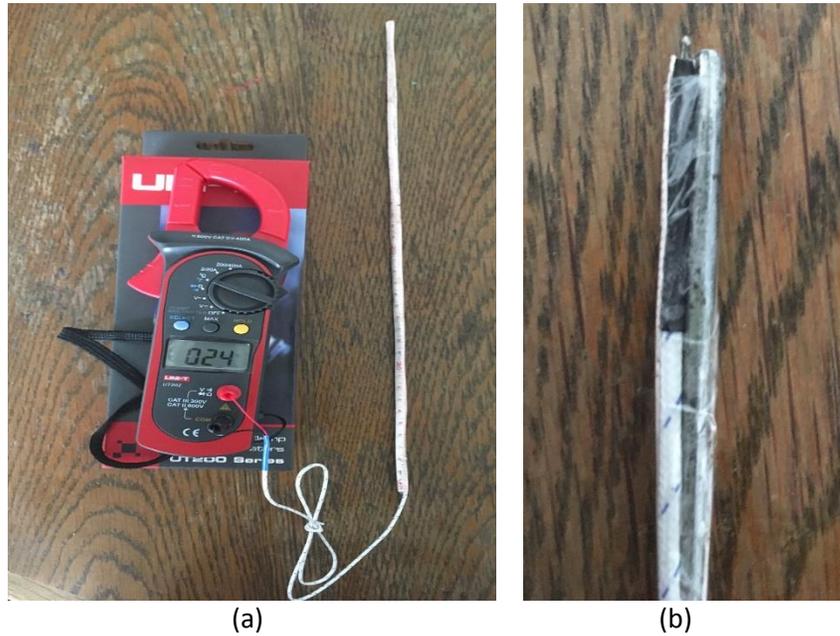
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA EL SEGUIMIENTO DE LAS VARIABLES.

Imagen 11. pHmetro de HANNA® Instruments referencia HI98103 con soluciones calibradoras certificadas HI7004L/C y HI7007L/C.



El pHmetro HI98103 fabricado por HANNA® Instruments es un Checker que permite medir el valor del pH en medios acuosos. Éste cuenta con un display que muestra inmediatamente el registro del pH con una resolución de 0,01. Para su calibración se requiere de dos soluciones buffer de calibración certificadas la HI7004L/C y la HI7007L/C, las cuales son adquiridas con el mismo fabricante del pHmetro.

Imagen 12. Multímetro UNI-T® referencia UT200 con termocupla tipo K (a), ampliación punta termocupla (b).



El multímetro referencia UT200 fabricado por la empresa UNI-T® cuenta con la opción de medir temperatura por medio de una termocupla tipo K. El rango de medida del equipo va de -40°C a 1000°C con una resolución de 1°C . Para la preservación de la integridad de la termocupla se adaptó una varilla que no interfiere en las mediciones.

ANEXO D.

PROTOCOLOS DE MEDICIÓN VARIABLES DE PROCESO.

Diagrama 1. Procedimiento medición de la temperatura.

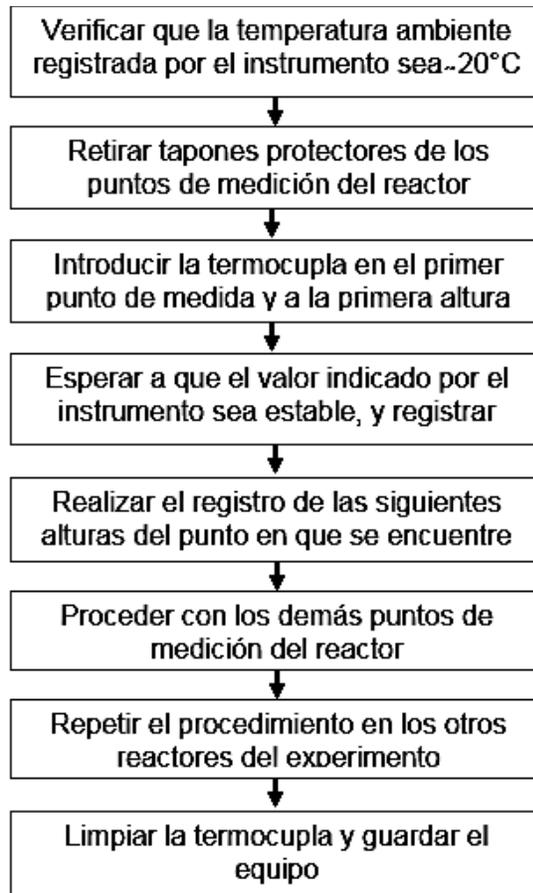


Diagrama 2. Procedimiento medición del pH.

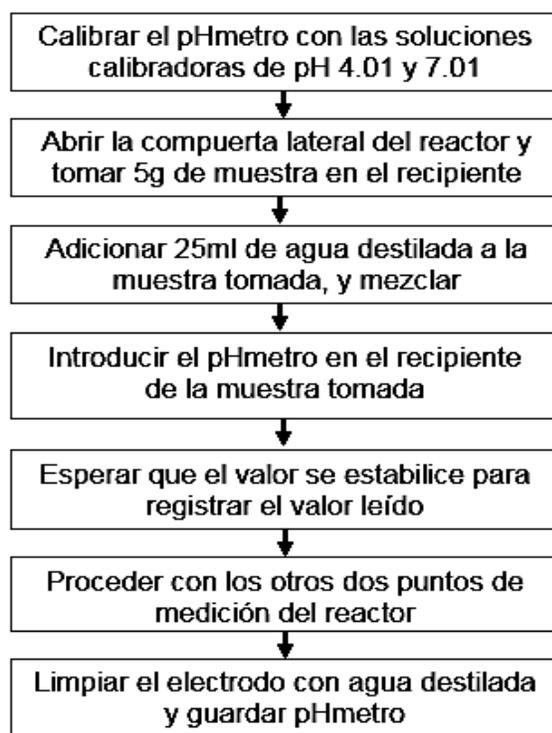


Diagrama 3. Procedimiento medición de humedad.

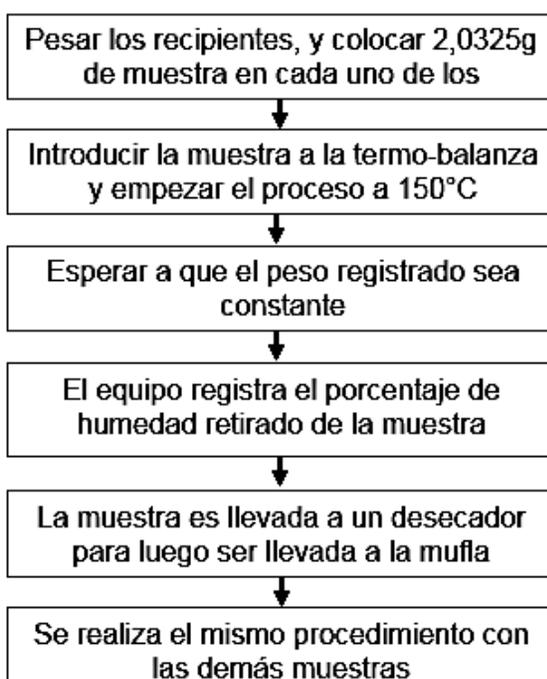
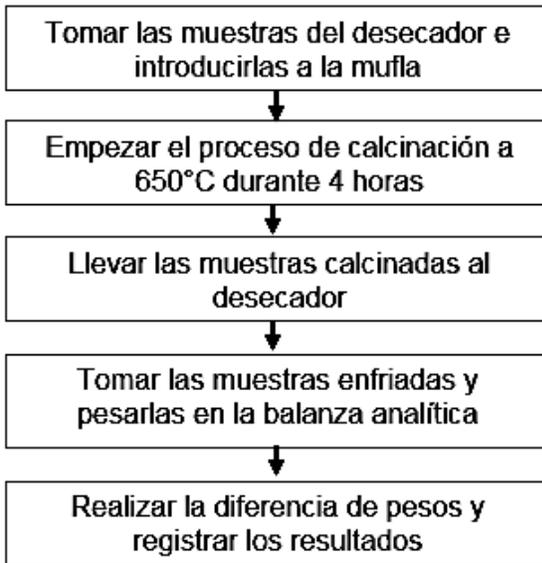


Diagrama 4. Procedimiento medición de cenizas.



ANEXO E.

BALANCE DE MATERIA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE C/N INICIAL, HUMEDAD INICIAL Y CANTIDAD AGENTE DE CARGA INICIAL

Balance Global

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 \quad (1)$$

Balances elementales

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + Q_3 C_3 = Q_4 C_4 \quad (2)$$

$$Q_1 N_1 + Q_2 N_2 + Q_3 N_3 = Q_4 N_4 \quad (3)$$

$$Q_1 H_1 + Q_2 H_2 + Q_3 H_3 = Q_4 H_4 \quad (4)$$

Relación C/N de la mezcla de la corriente salida

$$R = C/N = \frac{C_4}{N_4} \quad (5)$$

Al dividir la ecuación (2) con la (3) se obtiene la igualdad a la relación C/N deseada:

$$R = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2 + Q_3 C_3}{Q_1 N_1 + Q_2 N_2 + Q_3 N_3} \quad (6)$$

Al implementar la humedad aportada por cada uno de los agentes de carga se obtiene la siguiente expresión, hay que aclarar que C_n y N_n están en base húmeda:

$$R = \frac{Q_1(C_1(100-H_1)) + Q_2(C_2 \times (100-H_2)) + Q_3(C_3 \times (100-H_3))}{Q_1(N_1 \times (100-H_1)) + Q_2(N_2 \times (100-H_2)) + Q_3(N_3 \times (100-H_3))} \quad (7)$$

Para generar una ecuación que represente la humedad global aportada por todos los materiales involucrados al inicio del proceso, se los desarrolladores del modelo establecen un promedio de las humedades a la entrada del proceso.

$$G = \frac{Q_1 \times M_1 + Q_2 \times M_2 + Q_3 \times M_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \quad (8)$$

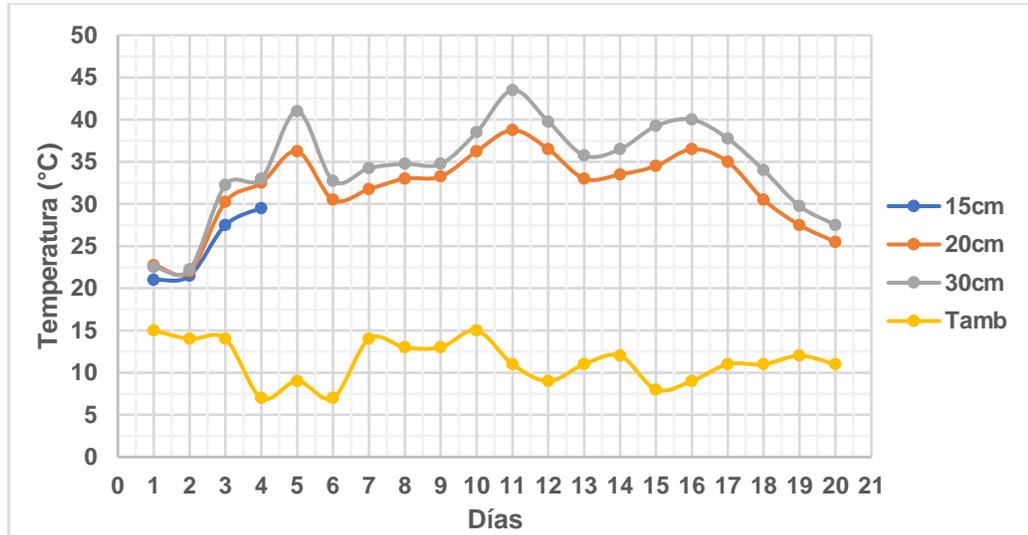
Como el césped es el de menor densidad aparente, implica que ocupará un gran volumen por lo tanto éste va a ser el material a calcular para el alimento. La ecuación (9) muestra el despeje de la ecuación (7) para el cálculo de la cantidad de poda (Q_3) de césped necesaria.

$$Q_3 = \frac{RQ_1N_1(100-H_1)+RQ_2N_2(100-H_2)-Q_1C_1(100-H_1)-Q_2C_2(100-H_2)}{C_3(100-H_3)-RN_3(100-H_3)} \quad (9)$$

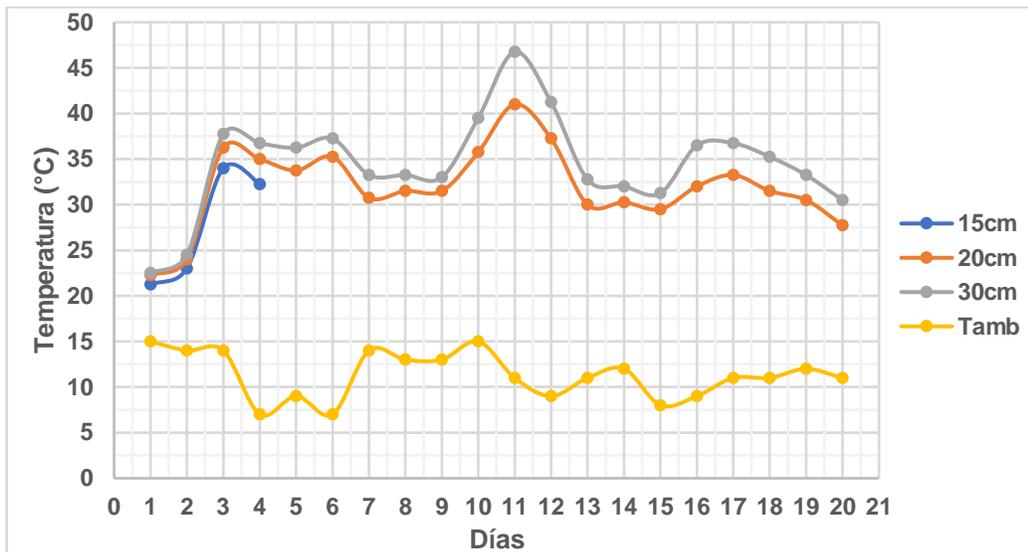
ANEXO F.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRE-EXPERIMENTACIÓN

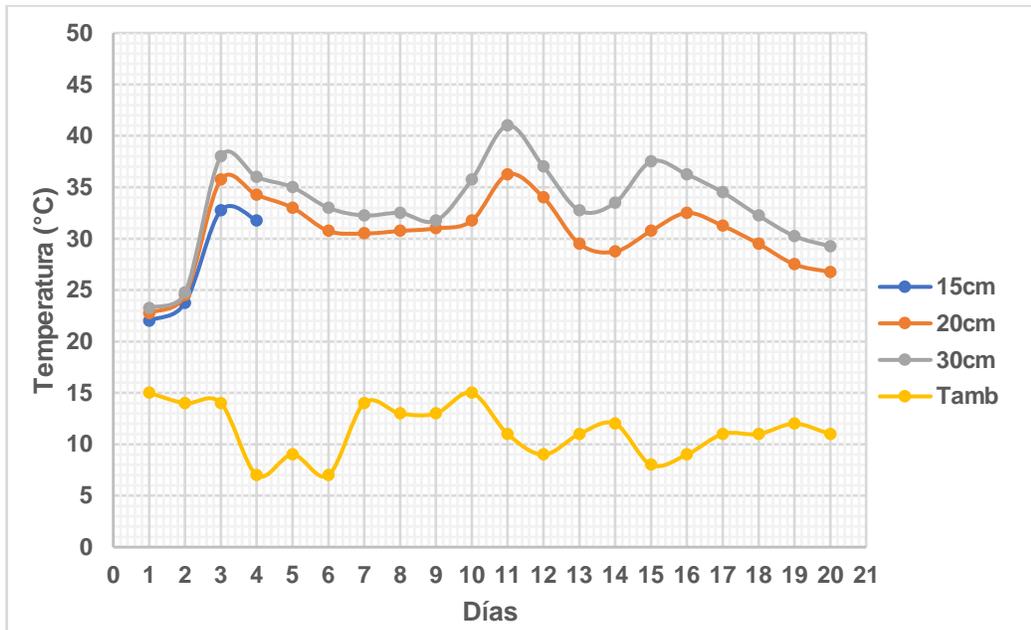
Gráfica 10. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 1.



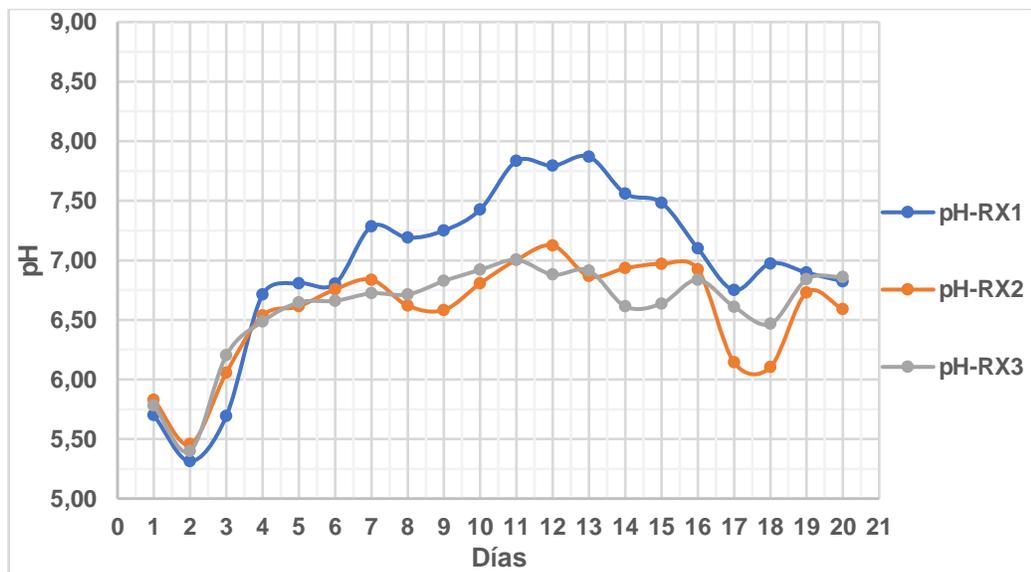
Gráfica 11. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 2.



Gráfica 12. Variación de la temperatura en el tiempo de compostaje en pre-experimentación para el Reactor 3.



Gráfica 13. Variación del pH en el tiempo de compostaje en pre-experimentación en los reactores.



ANEXO G.

FORMATOS DE SEGUIMIENTO DE TEMPERATURA Y pH

Fecha	Seguimiento Temperaturas Reactor 1 (°C)												T ambiente (°C)
	Punto 1			Punto 2			Punto 3			Punto 4			
	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	
01/02/2017	23	23	23	23	23	23	22	23	23	22	23	22	11
02/02/2017	27	29	31	27	33	34	28	32	35	28	32	32	13
03/02/2017	30	40	44	39	45	48	40	45	49	41	46	47	11
04/02/2017	36	43	51	44	52	55	45	52	54	46	50	52	12
05/02/2017	43	52	61	51	55	61	49	56	62	48	54	59	8
06/02/2017		41	47		44	52		45	51		46	51	10
07/02/2017		45	50		46	53		46	52		45	49	9
08/02/2017		36	40		41	47		40	45		34	41	10
09/02/2017		28	32		30	36		31	36		29	33	13
10/02/2017		27	30		27	31		27	30		27	31	10
11/02/2017		23	24		24	25		23	25		23	26	13
12/02/2017		23	24		23	24		24	25		25	26	12
13/02/2017		22	23		22	23		21	23		22	23	12
14/02/2017		20	23		21	23		21	23		22	22	13
15/02/2017		21	22		21	23		21	22		21	22	11
16/02/2017		18	20		19	21		21	21		20	22	12
17/02/2017		19	19		20	20		20	21		20	22	11
18/02/2017		18	19		18	19		18	19		19	19	13
19/02/2017		18	19		19	19		19	20		19	19	13
20/02/2017		19	19		19	20		19	20		19	20	11

Fecha	Seguimiento Temperaturas Reactor 2 (°C)												T ambiente (°C)
	Punto 1			Punto 2			Punto 3			Punto 4			
	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	
01/02/2017	22	22	23	22	22	22	22	23	23	22	21	21	11
02/02/2017	28	30	32	30	33	34	30	33	35	29	32	33	13
03/02/2017	36	43	47	42	46	48	44	47	49	40	45	47	11
04/02/2017	38	47	53	46	51	53	46	50	54	44	49	51	12
05/02/2017	43	52	62	48	56	64	52	58	62	48	56	60	8
06/02/2017		47	53		50	58		48	51		48	55	10
07/02/2017		44	48		48	53		47	52		46	51	9
08/02/2017		34	39		36	41		38	45		35	39	10
09/02/2017		31	35		33	38		35	36		36	39	13
10/02/2017		28	31		30	32		31	30		31	33	10
11/02/2017		25	27		27	30		28	25		25	28	13
12/02/2017		24	26		27	29		25	25		27	28	12
13/02/2017		21	22		22	25		23	23		24	24	12
14/02/2017		21	21		21	23		21	23		22	22	13
15/02/2017		20	21		19	22		20	22		20	21	11
16/02/2017		18	19		19	22		19	21		20	21	12
17/02/2017		19	20		20	21		19	21		21	22	11
18/02/2017		19	19		19	20		20	19		19	19	13
19/02/2017		19	19		19	20		20	20		19	20	13
20/02/2017		19	19		19	20		19	20		19	20	11

Fecha	Seguimiento Temperaturas Reactor 3 (°C)												T ambiente (°C)
	Punto 1			Punto 2			Punto 3			Punto 4			
	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	15cm	20cm	30cm	
01/02/2017	22	23	22	22	23	23	22	22	22	22	22	22	11
02/02/2017	26	29	31	29	33	35	29	33	34	29	31	31	13
03/02/2017	38	41	46	40	46	47	43	47	48	41	46	47	11
04/02/2017	40	44	51	43	51	53	46	52	54	46	49	50	12
05/02/2017	43	56	62	48	58	64	49	58	63	48	55	61	8
06/02/2017		47	54		48	59		52	58		47	52	10
07/02/2017		43	48		47	52		48	54		48	51	9
08/02/2017		37	40		40	46		44	51		37	42	10
09/02/2017		30	33		31	38		33	38		32	38	13
10/02/2017		28	30		29	31		28	31		27	30	10
11/02/2017		25	26		25	27		26	28		24	26	13
12/02/2017		23	25		23	25		23	26		23	24	12
13/02/2017		21	23		22	23		23	23		21	22	12
14/02/2017		19	20		20	21		19	22		21	22	13
15/02/2017		19	20		19	21		20	21		21	21	11
16/02/2017		19	21		18	21		20	21		20	21	12
17/02/2017		19	20		19	21		20	21		20	21	11
18/02/2017		19	19		19	19		18	19		18	19	13
19/02/2017		18	20		19	20		18	19		19	19	13
20/02/2017		19	20		19	20		20	20		20	20	11

Fecha	Seguimiento de pH Reactor 1					
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desv. Estándar	CV
01/02/2017	5,50	5,50	5,50	5,50	0,00	0,00
02/02/2017	4,85	5,36	5,13	5,11	0,26	0,05
03/02/2017	5,88	5,73	5,86	5,82	0,08	0,01
04/02/2017	6,33	6,52	6,39	6,41	0,10	0,02
05/02/2017	8,04	7,59	7,84	7,82	0,23	0,03
06/02/2017	7,61	7,81	7,69	7,70	0,10	0,01
07/02/2017	8,41	8,51	8,37	8,43	0,07	0,01
08/02/2017	8,53	8,41	8,36	8,43	0,09	0,01
09/02/2017	8,78	8,71	8,72	8,74	0,04	0,00
10/02/2017	8,74	8,7	8,59	8,68	0,08	0,01
11/02/2017	8,78	8,76	8,61	8,72	0,09	0,01
12/02/2017	8,83	8,85	8,82	8,83	0,02	0,00
13/02/2017	8,84	8,85	8,79	8,83	0,03	0,00
14/02/2017	8,62	8,66	8,42	8,57	0,13	0,02
15/02/2017	8,63	8,71	8,65	8,66	0,04	0,00
16/02/2017	8,72	8,64	8,63	8,66	0,05	0,01
17/02/2017	8,61	8,73	8,75	8,70	0,08	0,01
18/02/2017	8,73	8,71	8,7	8,71	0,02	0,00
19/02/2017	8,59	8,44	8,56	8,53	0,08	0,01
20/02/2017	8,57	8,64	8,61	8,61	0,04	0,00

Fecha	Seguimiento pH Reactor 2					
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desv. Estándar	CV
01/02/2017	5,52	5,52	5,52	5,52	0,00	0,00
02/02/2017	5,01	4,75	4,87	4,88	0,13	0,03
03/02/2017	4,59	5,49	5,56	5,21	0,54	0,10
04/02/2017	6,15	6,64	6,47	6,42	0,25	0,04
05/02/2017	7,25	7,4	7,86	7,50	0,32	0,04
06/02/2017	7,86	7,45	8,01	7,77	0,29	0,04
07/02/2017	8,39	8,42	8,19	8,33	0,13	0,02
08/02/2017	8,18	8,11	8,25	8,18	0,07	0,01
09/02/2017	8,52	7,47	8,3	8,10	0,55	0,07
10/02/2017	7,81	8,43	8,35	8,20	0,34	0,04
11/02/2017	8,82	8,78	8,77	8,79	0,03	0,00
12/02/2017	8,69	8,71	8,85	8,75	0,09	0,01
13/02/2017	8,81	8,78	8,79	8,79	0,02	0,00
14/02/2017	8,63	8,62	8,57	8,61	0,03	0,00

15/02/2017	8,67	8,65	8,72	8,68	0,04	0,00
16/02/2017	8,69	8,67	8,67	8,68	0,01	0,00
17/02/2017	8,62	8,73	8,67	8,67	0,06	0,01
18/02/2017	8,58	8,57	8,52	8,56	0,03	0,00
19/02/2017	8,6	8,64	8,69	8,64	0,05	0,01
20/02/2017	8,53	8,43	8,55	8,50	0,06	0,01

Fecha	Seguimiento pH Reactor 3					
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desv. Estándar	CV
01/02/2017	5,21	5,21	5,21	5,21	0,00	0,00
02/02/2017	4,93	5,01	4,7	4,88	0,16	0,03
03/02/2017	5,32	5,61	5,29	5,41	0,18	0,03
04/02/2017	6,49	6,4	6,24	6,38	0,13	0,02
05/02/2017	7,43	7,31	7,18	7,31	0,13	0,02
06/02/2017	7,91	8,06	8,02	8,00	0,08	0,01
07/02/2017	7,66	8,5	8,39	8,18	0,46	0,06
08/02/2017	8,58	8,52	8,49	8,53	0,05	0,01
09/02/2017	8,53	8,49	8,31	8,44	0,12	0,01
10/02/2017	8,7	8,72	8,64	8,69	0,04	0,00
11/02/2017	8,64	8,78	8,76	8,73	0,08	0,01
12/02/2017	8,78	8,66	8,76	8,73	0,06	0,01
13/02/2017	8,69	8,79	8,75	8,74	0,05	0,01
14/02/2017	8,51	8,56	8,51	8,53	0,03	0,00
15/02/2017	8,61	8,49	8,57	8,56	0,06	0,01
16/02/2017	8,52	8,44	8,49	8,48	0,04	0,00
17/02/2017	8,67	8,56	8,62	8,62	0,06	0,01
18/02/2017	8,6	8,54	8,6	8,58	0,03	0,00
19/02/2017	8,53	8,6	8,58	8,57	0,04	0,00
20/02/2017	8,46	8,34	8,46	8,42	0,07	0,01

ANEXO H.

FLUJO DE CAJA PARA EL PROYECTO EN UN HORIZONTE DE 10 AÑOS

Flujo de caja	0	1 año	2 año	3 año	4 año	5 año	6 año	7 año	8 año	9 año	10 año
Ingresos (COP)		\$ 48.336.000	\$ 50.752.800	\$ 53.290.440	\$ 55.954.962	\$ 58.752.710	\$ 61.690.346	\$ 64.774.863	\$ 68.013.606	\$ 71.414.286	\$ 74.985.001
Costos Producción (COP)		\$ 6.110.089	\$ 6.361.336	\$ 6.622.914	\$ 6.895.248	\$ 7.178.780	\$ 7.473.972	\$ 7.781.302	\$ 8.101.269	\$ 8.434.393	\$ 8.781.215
Costos Ingeniero (COP)		\$ 12.000.000	\$ 12.493.440	\$ 13.007.170	\$ 13.542.025	\$ 14.098.873	\$ 14.678.619	\$ 15.282.204	\$ 15.910.608	\$ 16.564.852	\$ 17.245.999
Costos Operario (COP)		\$ 11.783.103	\$ 12.393.939	\$ 13.036.440	\$ 13.712.249	\$ 14.423.092	\$ 15.170.786	\$ 15.957.239	\$ 16.784.462	\$ 17.654.569	\$ 18.569.782
Depreciación para Equipos (COP)		\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000
Utilidad antes de impuestos		\$ 7.920.809	\$ 8.982.086	\$ 10.101.916	\$ 11.283.440	\$ 12.529.964	\$ 13.844.969	\$ 15.232.119	\$ 16.695.267	\$ 18.238.473	\$ 19.866.005
Impuesto (34%)		\$ 2.693.075	\$ 3.053.909	\$ 3.434.651	\$ 3.836.369	\$ 4.260.188	\$ 4.707.290	\$ 5.178.920	\$ 5.676.391	\$ 6.201.081	\$ 6.754.442
Utilidad después de impuestos		\$ 5.227.734	\$ 5.928.177	\$ 6.667.264	\$ 7.447.070	\$ 8.269.776	\$ 9.137.680	\$ 10.053.198	\$ 11.018.876	\$ 12.037.392	\$ 13.111.563
Depreciación diferida (COP)		\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000	\$ 10.522.000
Amortización Crédito (COP)		\$ 7.796.960	\$ 8.769.436	\$ 9.863.203	\$ 11.093.390	\$ 12.477.012	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Inversión (COP)	\$ 55.220.000										
Flujo de caja neto	-\$ 55.220.000	\$ 7.952.773	\$ 7.680.741	\$ 7.326.062	\$ 6.875.680	\$ 6.314.765	\$ 19.659.680	\$ 20.575.198	\$ 21.540.876	\$ 22.559.392	\$ 23.633.563

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo **ALVARO JOSÉ RODRÍGUEZ MEDINA** en calidad de titular de la obra **Propuesta para la producción de un abono orgánico partiendo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales del Colegio Rochester**, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	x	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	x	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		x

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá D.C., a los 30 días del mes de junio del año 2017.

EL AUTOR:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Alvaro José	Rodríguez Medina
Documento de identificación No	Firma
1.019.087.849	