



Diseño y evaluación del compostaje como alternativa para el tratamiento de residuos de aditivos en la construcción*

Javier Mauricio González Díaz**, María Alejandra Medina***

Design and evaluation of composting as an alternative to treat waste from additives in construction industries

Desenho e avaliação do compostagem como alternativa para o tratamento de resíduos de aditivos na construção

RESUMEN

Introducción. La industria es un foco de generación de residuos de todo tipo, los cuales por su volumen están sujetos a ser tratados de manera particular y a gran escala, lo que implica costos para las empresas. En sus políticas de sostenibilidad, algunas empresas buscan alternativas para su tratamiento con el fin de disminuir estos costos y su impacto al medio ambiente. **Objetivo.** Establecer una alternativa de tratamiento de un residuo industrial denominado sedimento de aditivo proveniente de la industria de químicos para la construcción, y así evitar su disposición a través de incineración o relleno de seguridad. **Materiales y métodos.** Se realizó una caracterización fisicoquímica del residuo, demostrando su naturaleza orgánica y su inocuidad para organismos, por lo que se establece la posible viabilidad del tratamiento a través de un proceso de compostaje. Se diseñó un sistema de compostaje a escala para comprobar la tratabilidad del residuo en un proceso orgánico anaeróbico. En la prueba piloto se emplean otros residuos orgánicos como los de comida y poda, cuya proporción permanece constante en cuatro ensayos donde se adicionan dosis diferentes del sedimento de aditivo y se comparan frente a un blanco, siendo el ensayo 1 el blanco. Se aplica para el ensayo 2 una dosis

* Derivado del proyecto de investigación titulado "Diseño y evaluación de un sistema de compostaje como alternativa de tratamiento de residuos de aditivos para la construcción" realizado en el municipio de Tocancipá, durante el período de los años 2011 y 2012.

** Ingeniero Ambiental y Sanitario de la Universidad de La Salle; Especialista en Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos de la Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá. Docente Investigador del Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle - Bogotá - Colombia. Autor para correspondencia: javigonalez@unisalle.edu.co ***Ingeniera Ambiental Y Sanitaria de la Universidad de La Salle - Bogotá - Colombia, e-mail: maalemeri@yahoo.com

de 6.4L; para el ensayo 3, una dosis de 9.6L, y para el ensayo 4, 12.8L, cada tratamiento con una repetición, lo que da en total 8 ensayos diferentes. **Resultados.** Se estableció que en términos técnicos, aunque se obtiene mejor resultado sin el aditivo, este es susceptible de ser tratado mediante un proceso de compostaje, de acuerdo con la dosis suministrada en el ensayo 2. Finalmente, se determina la dosis adecuada de sedimento de aditivo a tratar en concordancia con la generación de residuos orgánicos de la planta y se analiza la viabilidad económica de la implementación del proyecto. **Conclusión.** Es más viable técnica y ambientalmente tratar el residuo a través del compostaje que disponerlo a través de incineración o relleno de seguridad.

Palabras clave: aditivos para la construcción, compostaje, compuestos orgánicos, tratamiento.

ABSTRACT

Introduction. Industries generate all types of waste. Due to the volumes, waste has to be treated in particular ways, and at a great scale level, thus bringing high costs for companies. In their sustainability policies, some organizations search for alternatives to treat waste in order to reduce these costs and their environmental impacts. **Objective.** Establishing an alternative to treat the industrial waste known as additive pellets from the chemical products for construction industries and, this way, avoid their disposal by the use of incineration or security filling. **Materials and methods.** A physical-chemical characterization of the waste was made, demonstrating its organic nature and its harmlessness for organisms, thus establishing the feasibility of treating it by means of a composting process. A composting system model was then designed, in order to test the treatability of the waste in an anaerobic organic process. Other organic waste materials were used in the pilot test, such as those from food and pruning, with constant proportions in four tests in which different doses of the additive pellet were added and compared to a target, being this target the test number 1. For the test number 2, a 6.4L dose was applied; for test number 3, a 9.6L dose and for test number 4, 12.8L. Each treatment had one repetition, totaling 8 different tests. **Results.** Under technical terms, even though the best result can be obtained without the additive, it can be treated by the use of a composting process, according to the dose administrated in test 2. Finally, the adequate dose of additive pellet to be treated was determined according to the plant's organic waste production and the economic feasibility of implementing the project was analyzed. **Conclusion.** It is more feasible to treat the waste by the use of composting than dissolving it by incineration or by security filling, under technical and environmental terms.

Key words: Construction additive pellets, composting, organic compounds, treatment.

RESUMO

Introdução. A indústria é um foco de geração de resíduos de todo tipo, os quais por seu volume estão sujeitos a ser tratados de maneira particular e a grande escala, o que implica custos para as empresas. Em suas políticas de sustentabilidade, algumas empresas procuram alternativas para seu tratamento com o fim de diminuir estes custos e seu impacto ao médio ambiente. **Objetivo.** Estabelecer uma alternativa de tratamento de um resíduo industrial denominado sedimento de aditivo proveniente da indústria de químicos para a construção, e assim evitar sua disposição através de incineração ou recheado de segurança. **Materiais e métodos.** Realizou-se uma caracterização físico-química do resíduo, demonstrando sua natureza orgânica e sua inocuidade para organismos, pelo que se estabelece a possível viabilidade do tratamento através de um processo de compostagem. Desenha-se um sistema de compostagem a escala para comprovar a tratabilidade do resíduo num processo orgânico anaeróbico. Na prova piloto se empregam outros resíduos orgânicos como os de comida e poda, cuja proporção permanece constante em quatro ensaios onde se adicionam doses diferentes do sedimento de aditivo e se comparam frente a um alvo, sendo o ensaio 1 o alvo. Aplica-se para o ensaio 2 uma dose de 6.4L; para o ensaio 3, uma dose de 9.6L, e para o ensaio 4, 12.8L, cada tratamento com uma repetição, o que dá ao todo 8 ensaios diferentes. **Resultados.** Estabeleceu-se que em termos técnicos, ainda que se obtém melhor resultado sem o aditivo, este é susceptível de ser tratado mediante um processo de compostagem, de acordo com a dose fornecida no ensaio 2. Finalmente, determina-se a dose adequada de sedimento de aditivo a tratar em concor-

dância com a geração de resíduos orgânicos da planta e se analisa a viabilidade econômica da implementação do projeto. **Conclusão.** É mais viável técnica e ambientalmente tratar o resíduo através do compostagem que o dispor através de incineração ou recheado de segurança.

Palavras importantes: aditivos para a construção, compostagem, compostos orgânicos, tratamento.

INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre ha dependido del consumo de recursos naturales o energía para los diversos procesos que ejecuta en la cotidianidad; sus hábitos de consumo influyen directamente en la generación de residuos inherente de sus procesos de producción de bienes y servicios, así como resultantes del consumo de estos. Los residuos sólidos generados por el ser humano están constituidos, por lo general, de materia orgánica como residuos de comida, hojas y restos de jardín, papel, cartón, madera y en general materiales biodegradables; y por materia inorgánica, como vidrio, plástico, metales, objetos de caucho, material inerte y otros (Montes, 2003). Los residuos sólidos orgánicos son materiales sólidos o semisólidos de origen animal, humano o vegetal que se abandonan, botan, desechan, descartan y rechazan, y son susceptibles de biodegradación incluyendo aquellos considerados como subproductos orgánicos provenientes de los procesos industriales (ICONTEC, 2009). Los residuos, para ser clasificados como biológicos, deben presentar componentes como azúcares, ligninas, celulosas, grasas y proteínas, entre otros. Cuando la fracción orgánica de residuos sólidos se va a utilizar para la elaboración de productos biológicos de conversión como compost, metano o etanol, la información sobre los nutrientes esenciales y los elementos del material residual es importante respecto a la disponibilidad de nutrientes para microorganismos, y para valorar los usos finales que puedan tener los materiales restantes después de la conversión biológica (Tchobanoglous, 1994).

El compostaje como proceso tiene una gran ventaja, en su posterior uso, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua, por lo que se obtienen suelos más esponjosos y con mayor humedad, lo que se traduce en mejores condiciones para cultivos, al existir un aporte adicional de nutrientes (Porta, 1999).

Con base en lo anterior, esta investigación pretende proponer una alternativa técnica y ambientalmente segura mediante un proceso de compostaje para un residuo proveniente de una actividad industrial, denominado sedimento de aditivo, lo cual permitirá realizar reducción de residuos que se eliminaran a través de incineración y, además, potenciar la posibilidad de reincorporar estos residuos al ciclo productivo.

Dado lo anterior, la estrategia para el aprovechamiento de estos subproductos industriales se enfoca en la aplicación de estos sedimentos en la producción de compostaje el cual es definido por (ICONTEC, 2009) como el proceso biológico controlado que permite la degradación y estabilización de la materia orgánica por la acción de microorganismos, y por medio del cual se obtiene abono. Es posible verlo como un sistema de tratamiento de los residuos orgánicos, ya que reduce la cantidad de materiales orgánicos susceptibles de ser aprovechados y que son dispuestos inadecuadamente, determinando un riesgo de contaminación de suelos, aguas y aire. Igualmente el compostaje responde a criterios de reciclaje interno y autosuficiencia (Rozo & Chaparro, 2005). En la actualidad este proceso se emplea para realizar el aprovechamiento de residuos orgánicos como excrementos animales, residuos de poda y de alimentos, en escala agrícola, por lo que en el contexto industrial, no se ha considerado hasta el momento como una alternativa de tratamiento a residuos de este sector económico.

Por consiguiente, para potenciar estos subproductos mediante la biotecnología del compostaje se propone la fabricación de un abono ejerciendo un control sobre los elementos que influyen en el

proceso de descomposición tales como el pH y temperatura, tal como se muestra en la figura 1. A través de este control es posible determinar las etapas en las que el proceso se desarrolla, su inicio y finalización, y de esta manera, obtener un producto final de buena calidad. El proceso de descomposición presenta cuatro etapas principales, dentro de las cuales se realiza el desarrollo microbiológico adecuado para que la descomposición se lleve a cabo en las condiciones adecuadas. La etapa de mayor relevancia dentro del proceso es la fase termófila, ya que en esta se da la descomposición de azúcares; cuando los microorganismos oxidan la materia orgánica, se promueve el rompimiento de las moléculas de carbono y la liberación de energía en forma de calor (Romero, 2002). En la figura 1 se evidencia el progreso de un proceso convencional de compostaje.

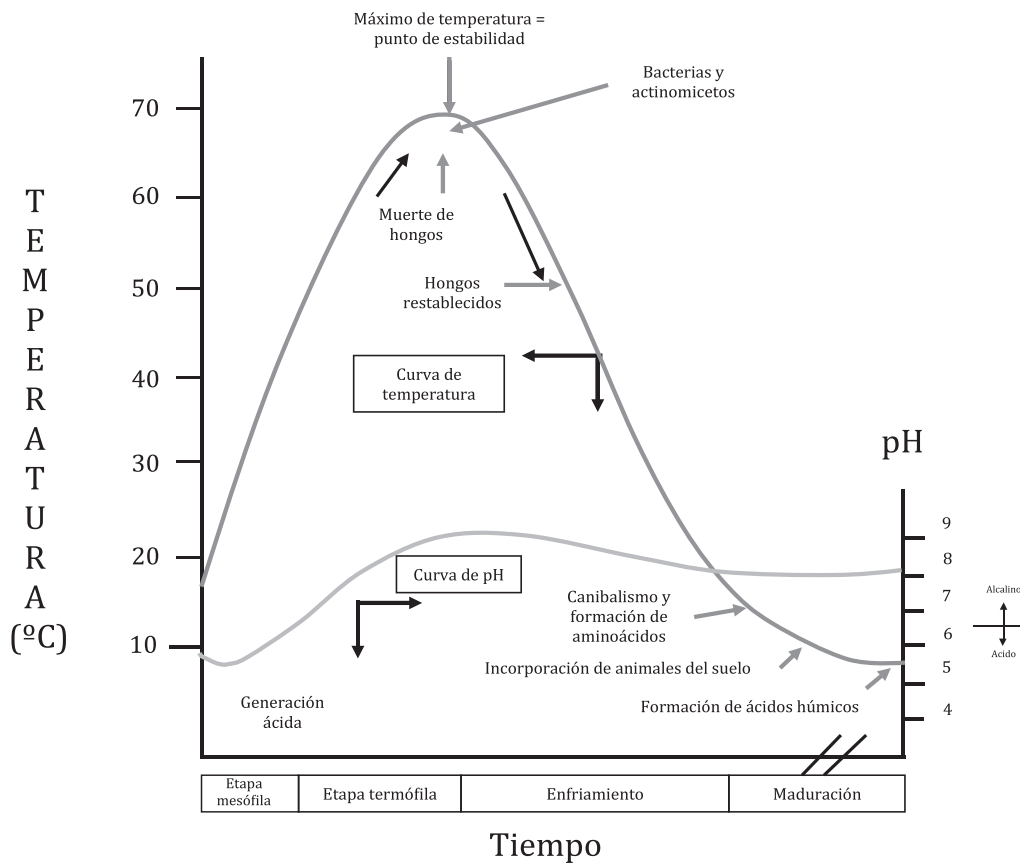


Figura 1. Etapas del proceso de compostaje

Fuente: Campitelli, Velasco, Rubenacker & Andrea (2010).

Posteriormente la investigación plantea un análisis para determinar la calidad final del compostaje producido, por lo que se debe llevar a cabo una evaluación en laboratorio que permita analizar los parámetros de madurez y estabilidad tales como la relación C/N, el color, el olor y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), así como los parámetros de identificación del uso del producto, los nutrientes y elementos menores, esto con el fin de evaluar la viabilidad de hacer uso del compostaje como sistema de tratamiento del sedimento de aditivo.

Con una generación mensual promedio de 1556 kg de sedimento de aditivo, se realiza un análisis económico considerando que el tratamiento del residuo in situ representaría una disminución de los

costos asociados a la incineración o disposición final en relleno de seguridad del sedimento de aditivo como residuo peligroso.

METODOLOGIA

Se hizo necesario efectuar un diagnóstico inicial de la cantidad de materiales orgánicos generados en la planta, incluyendo el sedimento de aditivo, y los residuos orgánicos de poda y comida. Adicionalmente, es necesario determinar la potencialidad del sedimento de aditivo como un material orgánico que permita su tratamiento a través del compostaje. Posteriormente, se diseña y ejecuta una prueba piloto del sistema de compostaje a escala, cuya finalidad es determinar la influencia de la aplicación del sedimento de aditivo a un proceso de compostaje convencional con diferentes dosis y a través de monitoreos periódicos. Finalmente se efectúan pruebas de calidad final a cada ensayo y se determina la viabilidad económica del proyecto de compostaje en escala real.

Generación de residuos

Se monitoreó durante cuatro meses la generación de residuos orgánicos de comida y de poda como base para realizar un proceso de compostaje, así como la generación del sedimento de aditivo, para así determinar las proporciones de la pila a ser implementada. En la tabla 1, se presenta la generación mensual de residuos orgánicos en la planta de Tocancipá.

Tabla 1. Generación mensual de residuos orgánicos planta Tocancipá

| Mes | Residuos poda (kg) | Comida (kg) | Sedimento de aditivo (kg) |
|-----------------|--------------------|--------------|---------------------------|
| Septiembre | 11,700 | 778 | 1,325 |
| Octubre | 4,900 | 1,395 | 1,475 |
| Noviembre | 2,500 | 1,474 | 1,200 |
| Diciembre | 11,000 | 1,106 | 2,225 |
| Total | 30,100 | 4,753 | 6,225 |
| Promedio | 4,688 | 1,173 | 1,556 |

Fuente: elaboración propia

Sedimento de aditivo

Los procesos de la empresa incluyen una amplia gama de aditivos para la construcción, los cuales son almacenados en silos tanto en la planta, al finalizar su fabricación, como en las concreteteras que hacen uso de los mismos. Dentro de la cadena, los aditivos son transportados de la planta a las concreteteras en isotanques. Tanto los silos como los isotanques, por índices de calidad, deben ser lavados (imagen 1), debido a la generación de sedimento de aditivo que, por sus características de densidad, no permite el adecuado funcionamiento de equipos de bombeo y mangueras, motivo por el cual se considera como un residuo. Siendo conocido el contenido de azúcares de los aditivos, el sedimento de aditivo se considera un residuo orgánico.

Proveniente de los procesos de lavado, se obtiene un residuo líquido que es una dilución de cada producto del que se haga el lavado, como se observa en la imagen 1, y es almacenado en las instalacio-

nes de la planta de Tocancipá en isotanques, donde se mezclan lavados de diferentes aditivos para la posterior disposición a granel de este residuo; ya que la generación diaria es inferior a los 150 litros se hace necesario almacenarlo hasta tener una cantidad representativa para disponer.



Imagen 1. Lavado de isotanques para transporte de producto

Fuente: Autores

Caracterización

El sedimento de aditivo, al ser resultante de la mezcla del residuo de varios aditivos, presenta una variabilidad en la mezcla de acuerdo con los lavados efectuados, por lo que se hace necesario efectuar un análisis teniendo en cuenta las características que tienen mayor probabilidad de presentarse; por ello se seleccionaron los tres tipos de aditivo con mayor índice de demanda, y se estableció una comparación de potencial peligrosidad y características generales de composición, proporcionada por la empresa fabricante y las hojas de seguridad. Aunque los detalles de composición de los aditivos no se presentan explícitamente, se reconoce en las fichas técnicas de los productos un elevado contenido de sustancias biodegradables, en su mayoría azúcares. Debido a este contenido, en términos de control de calidad y tiempo de vida de los aditivos para la construcción, la empresa también hace uso de sustancias químicas biocidas, las cuales podrían representar una menor tasa de biodegradabilidad del sedimento de aditivo en altas concentraciones, por lo que se consultaron las hojas de seguridad, que contienen información sobre el contenido de estas sustancias, información que no resulta relevante.

Para determinar la viabilidad del tratamiento del sedimento de aditivo a través de un proceso de compostaje debe comprobarse que este es un residuo orgánico, por lo que de acuerdo con las características de los productos, se evaluó el parámetro de azúcares totales. Para esto se tomaron 3 muestras de sedimento de aditivo generado: la primera muestra corresponde al almacenamiento en la planta Tocancipá; la segunda muestra corresponde a lavados de isotanques de transporte de pro-

ducto; la última muestra corresponde a sedimento de aditivo proveniente de una de las concreteteras que hace uso de aditivos.

Se realizó la medición de azúcares totales medidas como glucosa y fructosa haciendo uso del equipo Merck Reflectoquant método 045. Para determinar el potencial de degradabilidad del sedimento de aditivo, se agregaron levaduras activadas en agua tibia, para someter las tres muestras tomadas a fermentación por 7 días, por lo que se efectuó una medición de los azúcares totales y pH a cada una de las muestras antes y después. A continuación, en la tabla 2, se presenta el análisis de azúcares totales reportados en las muestras en la medición inicial.

Tabla 2. Análisis de azúcares totales a las muestras

| MUESTRA | Medición 1 | | | Medición 2 (fermentado) | | |
|---------|---------------|------|------------------|-------------------------|------|------------------|
| | AZÚCAR (mg/l) | pH | Temperatura (°C) | AZÚCAR (mg/l) | pH | Temperatura (°C) |
| 1 | 158 | 4.08 | 21.1 | 104 | 4.05 | 19.5 |
| 2 | 122 | 3.99 | 21.3 | 92 | 4.1 | 20 |
| 3 | 83 | 5.6 | 21.5 | <65 | 4.06 | 19.1 |

Fuente: elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de fermentación, se midió el nivel de azúcar en cada una de las muestras, y los alcoholes, producto de la fermentación, haciendo uso de un densímetro Baumé, el cual reporta un valor de densidad. Cada grado Baumé equivale aproximadamente a 18 g/L de azúcares reductores. En la tabla 3, se presentan los reportes de medición de alcohol producido por fermentación.

Tabla 3. Medición de alcohol producido por fermentación

| MUESTRA | Medición 2 (fermentado) | | | |
|---------|-------------------------|------|------------------|--------------------|
| | AZÚCAR REDUCIDO (mg/l) | pH | Temperatura (°C) | Grados Baumé (°Bé) |
| 1 | 54 | 4.05 | 19.5 | 7 |
| 2 | 30 | 4.1 | 20 | 6 |
| 3 | 20 | 4.06 | 19.1 | 7 |

Fuente: elaboración propia

Asimismo, como estudio adicional del residuo, la empresa ya había realizado pruebas de toxicidad haciendo uso de la *Daphnia Magna* como bioindicador; el resultado del ensayo fue una concentración letal media de 0.17 % en 48 horas con sensibilidad del 95 %, y se concluyó que el sedimento de aditivo no es tóxico, ya que no se presentó la muerte de ninguno de los organismos objeto de estudio. Finalmente se comprobó que el sedimento de aditivo es un residuo orgánico no tóxico que puede ser degradado, sin causar ningún efecto adverso en el medio ambiente.

Prueba piloto

La proporción de materiales orgánicos fue determinada según proporciones de generación en los períodos evaluados, y se mantuvo constante en cada uno de los ensayos; la única variable fue la cantidad de aditivo adicionada a cada una de las cajas. Se adicionaron otros elementos que según la teoría

sobre compostaje tradicional facilitan el proceso de descomposición. Las mezclas de materiales y su respectiva proporción en la prueba piloto se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Prueba piloto, proporción de materiales

| Ensayo Uno | Ensayo Dos | Ensayo Tres | Ensayo Cuatro |
|--|--|--|--|
| | Sedimento de aditivo 1 dosis (6.4 L) | Sedimento de aditivo 1.5 dosis (9.6 L) | Sedimento de aditivo 2 dosis (12.8 L) |
| Residuos orgánicos de poda | Residuos orgánicos de poda | Residuos orgánicos de poda | Residuos orgánicos de poda |
| Residuos orgánicos de preparación de alimentos | Residuos orgánicos de preparación de alimentos | Residuos orgánicos de preparación de alimentos | Residuos orgánicos de preparación de alimentos |
| 1 kg cascarilla de arroz | 1 kg cascarilla de arroz | 1 kg cascarilla de arroz | 1 kg cascarilla de arroz |
| 1 kg suelo | 1 kg suelo | 1 kg suelo | 1 kg suelo |

Fuente: elaboración propia

Adición del sedimento de aditivo

De acuerdo con la humedad observada de los materiales se aplicó el sedimento de aditivo (tabla 59, objeto de estudio, por baches, es decir, para que el aditivo fuera retenido en los materiales y evitar las pérdidas por lixiviación, se agregó por tandas de 3 litros por día, iniciando desde la semana 2 donde se observó que la lixiviación propia de los residuos orgánicos de comida disminuyó.

Tabla 5. Control adición de sedimento de aditivo a los ensayos

| | Ensayo 1 y repetición | Ensayo 2 y repetición | Ensayo 3 y repetición | Ensayo 4 y repetición |
|-------|------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| Dosis | Sedimento de aditivo 0 dosis | Sedimento de aditivo 1 dosis (6.4 L) | Sedimento de aditivo 1.5 dosis (9.6 L) | Sedimento de aditivo 2 dosis (12.8 L) |
| Día 1 | | 3 l | 3l | 3l |
| Día 2 | | 3 l | 3 l | 3 l |
| Día 3 | | 0.4 l | 3 l | 3 l |
| Día 4 | | | 0.6 l | 3 l |
| Día 5 | | | | 0.8 l |

Fuente: elaboración propia

Para la adición de sedimento de aditivo a los ensayos, se realizó la medición volumétrica en una probeta, se adicionó lentamente el sedimento de aditivo para una mejor retención en los materiales, haciendo que la pérdida por lixiviación fuera mínima. Durante la aplicación del sedimento de aditivo se mantuvo especial observación en las pérdidas que se presentaban enseguida, para medir finalmente la cantidad del residuo lixiviada. De acuerdo con la observación del progreso de la descomposición, se decidió realizar una adición de levaduras para potenciar la biodegradación de los residuos orgánicos aún visibles a simple vista.

Controles operacionales

Control de temperatura

Se estableció para el control de temperatura una frecuencia de 3 veces a la semana distribuidas uniformemente, los días lunes, miércoles y viernes durante el período de descomposición de los materiales. Para mantener el control de este importante parámetro se hizo uso de una termocupla de punta afilada para facilitar su inserción en los materiales de compostaje (imagen 2); la temperatura de la pila permite conocer la etapa de descomposición en la que se encuentran los materiales, ya que este parámetro indica la actividad microbiana presente. La medición se realizó tomando 4 diferentes puntos dentro de la caja para así obtener un registro promedio del comportamiento en la pila; una vez se insertaba la termocupla en cada uno de estos puntos, se dio un tiempo de estabilización de 3 minutos para obtener un dato más preciso.

Control de pH

Con un equipo multiparamétrico portátil se realizó la medición del pH los días lunes, miércoles y viernes; se procedió a tomar una muestra de la parte inferior de cada uno de los cajones, con la cual se preparó una pasta con agua destilada, en proporción 1:2, en la que se insertó el sensor del multiparamétrico teniendo cuidado de que este quedara sumergido en la pasta (imagen 3); en cada medición se dio un tiempo de 1 minuto para que el equipo se estabilizara y la medición fuera más precisa.

Control de olores

Mientras se realizó la construcción de las capas de materiales en las pilas se adicionó cal con el fin de mantener un control de los olores generados por la descomposición del material orgánico.

Control de humedad y descomposición de materiales

Se realizó volteo del material con el fin de homogeneizar los materiales y proporcionar oxígeno con una frecuencia semanal, como se muestra en la imagen 4. Asimismo para mantener la humedad uniforme en los cajones, se realizó la humectación con sedimento de aditivo, según fuera necesario.

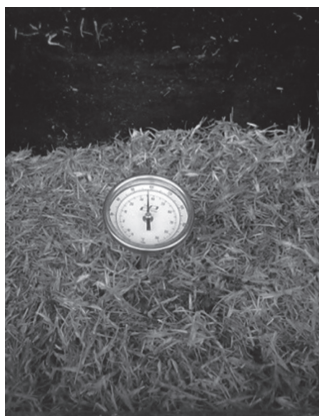


Imagen 2. Medición temperatura en pilas



Imagen 3. Medición de pH en pilas



Imagen 4. Volteo pilas

RESULTADOS

Al observarse un alto nivel de humedad en la etapa inicial del proceso, en todos los ensayos, se realizó la aplicación paulatina del sedimento de aditivo; asimismo se determinó que es importante no solo realizar el monitoreo, sino que también el sedimento de aditivo representa un elemento factible para compensar la deficiencia de humedad posterior a la etapa termófila, en la que las elevadas temperaturas podrían aumentar la tasa de evaporación del agua del compost y compensarían las pérdidas por lixiviación. De acuerdo con las mediciones realizadas frente a la generación de residuos orgánicos se concluyó que es posible tratar en promedio mensual 586 l kg de residuos sólidos, frente a 1557 kg de sedimento de aditivo generados, lo que muestra que los residuos sólidos son capaces de asimilar el sedimento de aditivo, en la aplicación inicial y como elemento humectante de la pila.

En términos de temperatura (figura 2), el ensayo 2 obtuvo una variación de temperatura similar a la prestablecida, mostrando cada una de las etapas por las que pasa el proceso. Alcanzó, además, el mayor pico de aumento de temperatura en la etapa termofílica (45 °C), al acercarse al rango ideal de 60 °C, mientras el ensayo 4, que presentaba 12.8L de sedimento de aditivo, debido a la elevada humedad evidenciada, no alcanzó mayores temperaturas sino hasta el final del proceso, donde se realizó el último volteo.

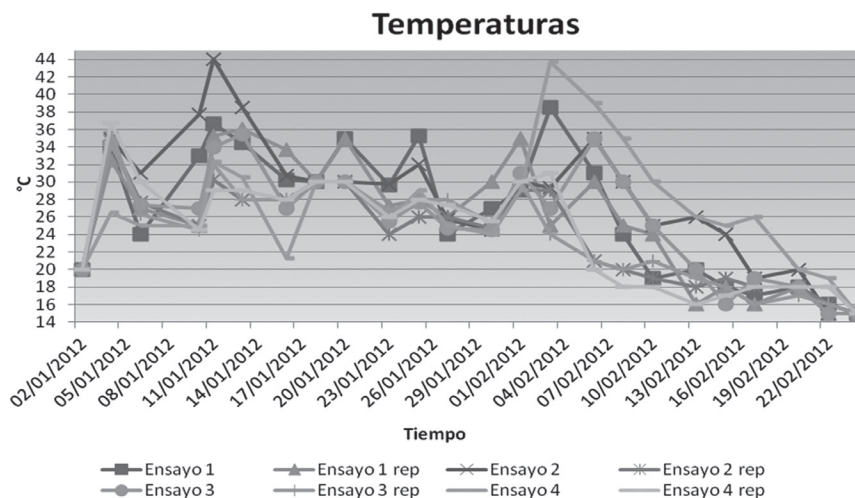


Figura 2. Temperaturas reportadas en ensayos de prueba piloto

Fuente: elaboración propia

Ensayo I

Para el ensayo I en la primera semana se evidenció una producción acelerada de lixiviados, puesto que los residuos de comida aún estaban frescos, mientras que en la segunda semana se observó una reducción acelerada de la temperatura debido al aumento de la humedad y a que se presentaron zonas anóxicas por no existir espacios de oxigenación entre las partículas de los residuos; este comportamiento se presentó en el ensayo I y en su repetición. Para proporcionar oxígeno, se efectuó un volteo, dentro de lo cual se evidenció un olor a descomposición anaerobia; durante el volteo se adicionó un poco de cascarilla de arroz para adicionar espacio entre los residuos y así permitir el ingreso de oxígeno.

Posterior al volteo se observó un incremento de la temperatura; en la semana 3, al ver que la temperatura disminuye se insertan tuberías de 3/8" para permitir la oxigenación de la pila, ya que se perciben olores a amoníaco y a putrefacción. Al presentarse una disminución mayor de la temperatura, en la semana 4 se procede a hacer una inoculación de levaduras en todos los ensayos, ya que aún se observa la presencia de residuos sin descomponer; a esto se observa la respuesta del aumento de la temperatura, alcanzando el máximo durante el ensayo. La temperatura presentó una estabilización en los 38 °C, puesto que debido al volumen tan pequeño de la pila no se da un calentamiento mayor. Finalmente al cabo de 8 semanas se observa una disminución y estabilización de la temperatura con la temperatura ambiente. A partir de la séptima semana se percibe un olor a tierra y en el último volteo fue evidente que ciertas zonas no alcanzaron una oxigenación adecuada, por lo que en ciertas partes no se presentó una descomposición total. Las variaciones de pH se presentaron como se espera según la teoría. En las figuras 3 y 4, se observa el comportamiento de la degradación del material a compostar en función de la temperatura y el pH.

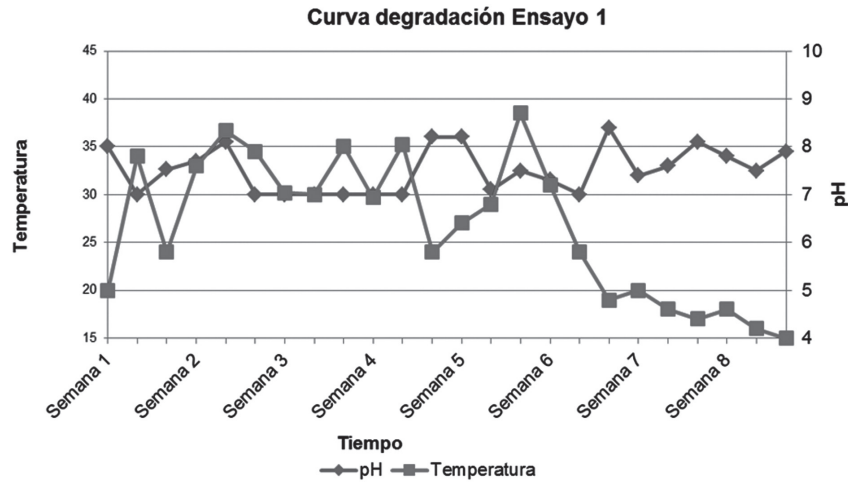


Figura 3. Curva degradación ensayo I

Fuente: elaboración propia

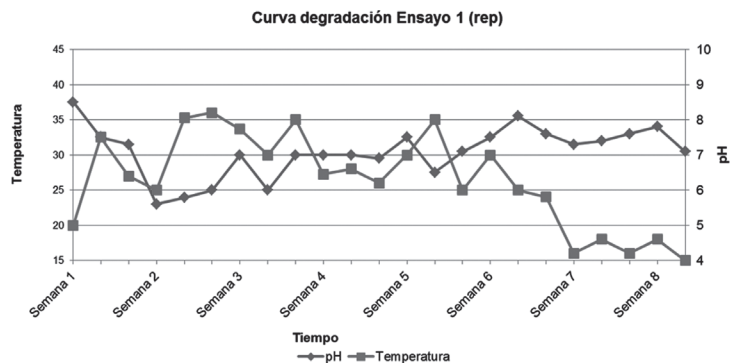


Figura 4. Curva degradación repetición ensayo I

Fuente: elaboración propia

Ensayo 2

En el ensayo 2 y su repetición se observó que las temperaturas reportadas fueron menores; esto pudo ser debido a las características de los residuos de comida compostados. En términos generales se presentó una disminución de la temperatura con la adición de sedimento de aditivo, lo cual incrementó la humedad, por lo que se disminuyó la actividad microbiológica y, por supuesto, la temperatura. Para controlar este factor se incorporaron tuberías tipo flauta de 3/8" para proporcionar oxígeno a la pila, y así mantener actividad microbiológica garantizando la descomposición de la pila. Al igual que en el ensayo 1, en la semana 6 se inocularon levaduras con el fin de descomponer los últimos residuos identificables, a lo que respondió con un aumento de temperatura. Finalmente se alcanzó una estabilización de la temperatura y pH, lo cual indica el cese de la actividad y el inicio de la etapa de maduración del compost. En las figuras 5 y 6 se observa el comportamiento de la degradación del material a compostar en función de la temperatura y del pH para el ensayo 2.

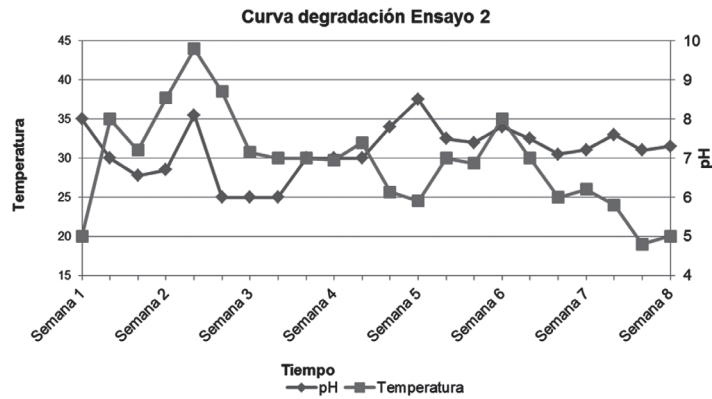


Figura 5. Curva degradación ensayo 2

Fuente: elaboración propia

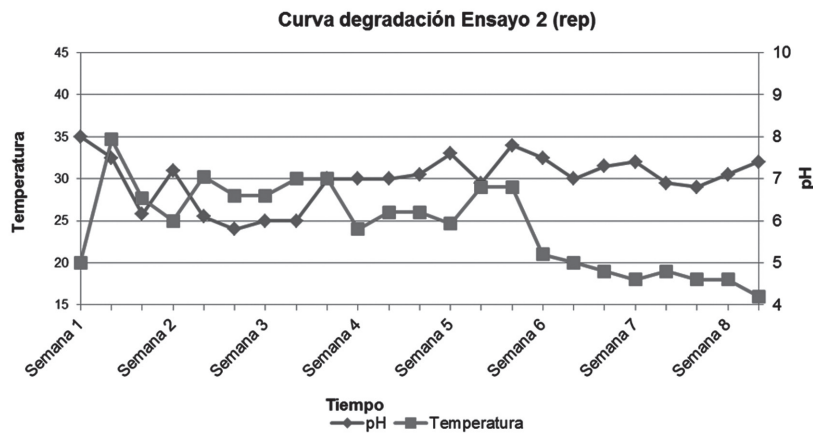


Figura 6. Curva degradación repetición ensayo 2

Fuente: elaboración propia

Ensayo 3

En el ensayo 3 y su repetición se observa con mayor detalle cada una de las etapas con respecto al parámetro de pH; en la primera semana se presentó la acidificación por la descomposición acelerada de los residuos de comida, por lo que hubo una elevada generación de lixiviados; a partir de la semana 2 se neutralizó el pH de la pila. En cuanto a la temperatura, el comportamiento fue muy similar a lo largo del tiempo, a pesar de la inoculación de bacterias. El comportamiento del ensayo 3 y su repetición fueron homogéneos. En las figuras 7 y 8 se observa el comportamiento de la degradación del material a compostar en función de la temperatura y el pH para el ensayo 3.

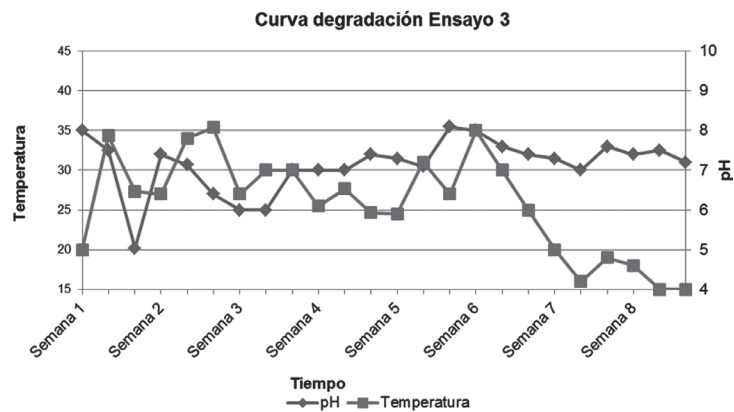


Figura 7. Curva degradación ensayo 3

Fuente: elaboración propia

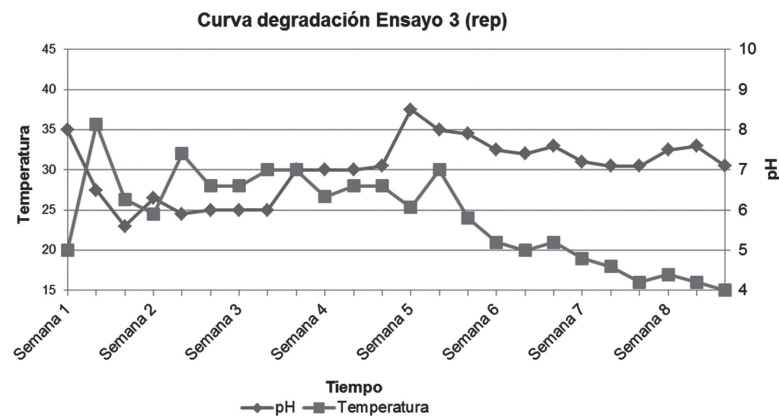


Figura 8. Curva degradación repetición ensayo 3

Fuente: elaboración propia

Ensayo 4

El ensayo 4 y su repetición presentaron aumentos poco significativos en la temperatura, debido al aumento de la humedad por la adición de sedimento de aditivo, ya que a este ensayo correspondía la

mayor dosis de este residuo. Sin embargo, con la inoculación de levaduras la temperatura presentó un aumento mucho mayor a los registrados anteriormente. Sumado a esto, influyen también las características de los residuos de comida incorporados, puesto que con el cambio de menú en el restaurante cada uno de ellos es diferente, cada día y cada semana; adicional a eso, también el comportamiento de la temperatura fue diferente en el ensayo 4 y su repetición (ensayo 4 rep.). Al cabo de las 8 semanas se observa la disminución de la temperatura hasta encontrarse con la temperatura ambiente (figuras 9 y 10).

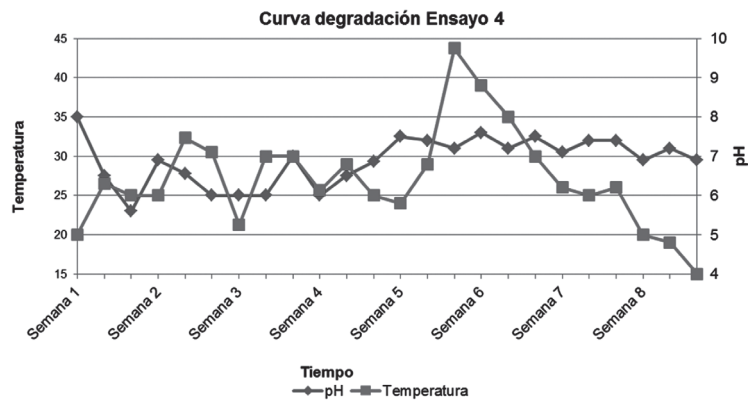


Figura 9. Curva degradación ensayo 4

Fuente: elaboración propia

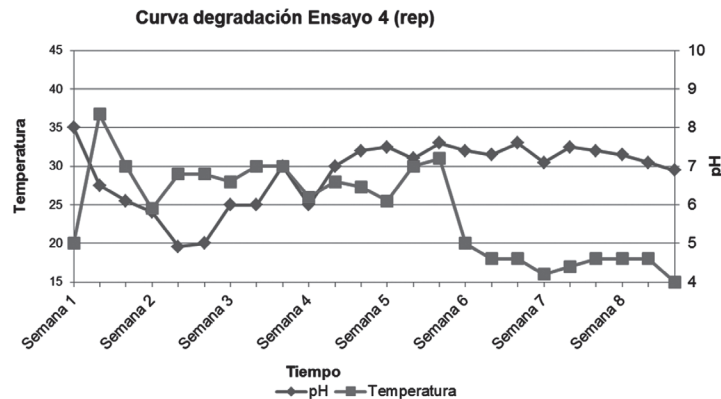


Figura 10. Curva degradación repetición ensayo 4

Fuente: elaboración propia

Evaluación final de la calidad

Como referencia para la evaluación de la calidad del producto final obtenido del ensayo, se tomaron los parámetros para fertilizantes o abonos orgánicos, orgánico-minerales y enmiendas orgánicas, contenidos en la NTC 5167 de 2003, donde se establecieron principalmente: relación C/N, capacidad de intercambio catiónico, pH y, como adicionales para determinar la calidad del abono, los nutrientes y elementos menores que serían representativos para su posterior uso como abono.

Bajo los parámetros de la NTC 5167 del 28 de mayo del 2003, que regula los productos para la industria agrícola y los materiales orgánicos utilizados como fertilizantes o acondicionadores de suelos; reglamenta los limitantes actuales para el uso de materiales orgánicos, los parámetros físico-químicos de los análisis de las muestras de material orgánico y los límites máximos de metales pesados, y enuncia algunos parámetros para los análisis microbiológicos, se realizó un análisis, en el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), de los diferentes parámetros de calidad de cada uno de los compost resultantes al cabo de 8 semanas para evaluar la influencia de la incorporación del sedimento de aditivo a cada uno de los ensayos. En la tabla 5 se presenta el consolidado de los datos obtenidos en los análisis realizados; se evidencia que cada ensayo, así como su repetición no presentaron un comportamiento uniforme, probablemente debido a las características fisicoquímicas de los residuos empleados en el proceso de compostaje.

Se destacan los parámetros en los que las muestras presentaron mayor y menor valor de cada uno de ellos con el fin de determinar la dosis que podría representar un mejor resultado reflejado en la calidad del producto. A continuación se presentan, en la tabla 6, los resultados de ensayos del laboratorio del IGAC.

Con la determinación de los nutrientes y los elementos menores es posible definir el posterior uso que se dará al abono. Mientras la relación C/N contempla la relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total contenido en el producto final, donde la concentración de carbono orgánico total de un compost es un indicador de su concentración en materia orgánica y, por tanto, un índice de calidad del compost, este dato provee la información de materia orgánica compostable y materia orgánica resistente. Por otro lado, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) representa un indicador de la capacidad para retener cationes intercambiables, lo que se traduce en la posibilidad de mantener plantas en buenas condiciones de nutrición para su desarrollo y crecimiento. (Mirabelli, 2008). Esta es útil también para definir el tipo de acondicionamiento que puede proporcionar a suelos según su uso.

Determinación de la dosis recomendada

De acuerdo con los resultados, la dosis óptima para realizar el tratamiento al sedimento de aditivo a través del compostaje es la empleada en el ensayo 2, o sea 6.4 L. Mediante la observación durante la aplicación del sedimento de aditivo a cada una de las cajas, se logró obtener las pérdidas que hubo en la aplicación del sedimento de aditivo, por lo que se conoce la dosis real retenida en los materiales. Se efectuó el cálculo de la dosis apropiada y la cantidad de sedimento de aditivo que es posible tratar con los materiales generados en la empresa al cabo de un mes. En la tabla 7, a continuación, se muestra un resumen de los datos resultantes frente a la dosis, evidenciando que la dosis posible de tratar en un mes es de 1687.9L.

Análisis económico

Posteriormente se realizó la evaluación de costos de la incorporación del proyecto de compostaje como tratamiento del sedimento de aditivo, desde la perspectiva de evitar la incineración o la disposición en relleno de seguridad de este residuo tablas 8 y 9. Teniendo en cuenta que la incineración cuesta \$1200/ kg (pesos del 2012), y la disposición a través de solidificación en relleno de seguridad tiene un costo de \$690/ kg (pesos del 2012), se evaluó el flujo de caja neto asumiendo una generación mensual promedio de 1556 kg y los costos de construcción de un centro de compostaje diseñado de acuerdo con las pruebas realizadas, con el valor de los materiales bajo cotización.

De acuerdo con el flujo de caja neto se obtuvo la viabilidad económica del proyecto garantizando que al evitar la disposición de los residuos por otros métodos, se recupera la inversión en el segundo y tercer mes de funcionamiento del proyecto. Se estimó que se empiezan a evidenciar ingresos por la producción y comercialización del compostaje a partir del tercer mes, que fue el tiempo estimado de descomposición de los materiales compostados en prueba piloto. Se estima también que se puede dar una producción aproximada de 5000 kg por mes, saliente de cada una de las pilas; este compostaje puede ser comercializado de acuerdo con lo establecido por la empresa a un precio de \$1000/ kg (pesos del 2012).

Tabla 6. Resultados de ensayos de laboratorio IGAC

| Parámetro | Unidades | Ensayo 1 | Ensayo 1 rep | Ensayo 2 | Ensayo 2 rep | Ensayo 3 | Ensayo 3 rep | Ensayo 4 | Ensayo 4 rep |
|-------------------|----------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| Madurez | N | 0.81 | 0.74 | 0.71 | 0.81 | 0.67 | 0.77 | 0.81 | 0.75 |
| | C | 8.5 | 7.8 | 7.5 | 8.5 | 7.1 | 8.1 | 8.5 | 7.9 |
| | C/N | 10.49 | 10.54 | 10.56 | 10.49 | 10.60 | 10.52 | 10.49 | 10.53 |
| Nutrientes | CIC | 172 | 94.9 | 107 | 54.5 | 89.9 | 101 | 63.7 | 79.9 |
| | Ca | 53.7 | 47.7 | 98.3 | 54.5 | 120 | 130 | 56.2 | 105 |
| | Mg | 18 | 15.7 | 18.9 | 19.4 | 18.5 | 16.3 | 19.6 | 11.7 |
| | K | 77.1 | 70.8 | 67.3 | 74.5 | 59.3 | 55.6 | 75.1 | 34.6 |
| | Na | 24.6 | 22.1 | 25.9 | 24.6 | 29.8 | 27.9 | 24.5 | 22.7 |
| | P | 1549 | 936 | 953 | 1009 | 636 | 532 | 850 | 442 |
| | Mn | 39.7 | 37.8 | 29 | 41.6 | 23.2 | 26.5 | 42.9 | 23.8 |
| Elementos menores | Fe | 86.3 | 44.7 | 45.3 | 48.3 | 65.1 | 38.2 | 76.8 | 40 |
| | Zn | 23 | 26.9 | 16.9 | 18.6 | 15.6 | 15.4 | 34.1 | 17.7 |
| | Cu | 2.7 | 2.1 | 2.1 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 2.2 | 1.3 |
| | B | 36.4 | 32.5 | 74.9 | 35.3 | 33.7 | 37.4 | 35.7 | 40.7 |

Fuente: IGAC, 2012.

Tabla 7. Dosis para materiales generados en planta Tocancipá

| | | |
|--|--------|-------|
| Dosis total ensayo 2 | 6.4 | L |
| Dosis parcial de ensayo 2 | 3 | L |
| Cantidad material ensayo 2 | 20 | kg |
| Perdidas por lixiviación promedio ensayo 2 de 3L adicionados | 0.9 | L |
| Perdidas por lixiviación | 30 | % |
| Aditivo sin perdidas por lixiviación | 5.76 | L |
| Material generado promedio mensual | 5,861 | kg |
| Dosis para material generado | 1687.9 | L/mes |
| Dosis diaria | 84.39 | L/día |
| Duración del proceso | 2 | meses |
| Cantidad de aditivo a tratar durante el proceso | 3375.8 | L |

Tabla 8. Análisis flujo de caja neto con disposición del residuo en relleno de seguridad (pesos del 2012)

| Implementación proyecto | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Costos de disposición del residuo relleno de seguridad | -\$1.159.890 | -\$1.159.890 | -\$1.159.890 | -\$1.159.890 |
| Costos de construcción del proyecto | -\$5.000.860 | | | |
| Costos de funcionamiento | | -\$3.364.000 | -\$3.364.000 | -\$3.364.000 |
| Ingresos venta de compostaje | | | | \$ 5.000.000 |
| Ahorro de disposición relleno de seguridad | | \$ 1.159.890 | \$ 2.319.780 | \$ 3.479.670 |
| Total | \$ -5.000.860 | \$ -2.204.110 | \$ -1.044.220 | \$ 5.115.670 |

Fuente: Elaboración propia de los autores

Tabla 9. Análisis flujo de caja neto con disposición del residuo a través de incineración (pesos del 2012)

| Implementación proyecto | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--|---------------|---------------|--------------|--------------|
| Costos de disposición del residuo incineración | \$ 2.017.200 | \$ 2.017.200 | \$ 2.017.200 | \$ 2.017.200 |
| Costos de construcción del proyecto | -\$5.000.860 | | | |
| Costos de funcionamiento | | -\$3.364.000 | -\$3.364.000 | -\$3.364.000 |
| Ingresos venta de compostaje | | | | \$ 5.000.000 |
| Ahorro de disposición incineración | | \$ 2.017.200 | \$ 4.034.400 | \$ 6.051.600 |
| Total | \$ -5.000.860 | \$ -1.346.800 | \$ 670.400 | \$ 7.687.600 |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con estos flujos de caja netos, se evidencia que el proyecto es viable económicamente, ya que se reducen costos y al mismo tiempo se obtiene un ingreso por concepto de la venta del compostaje.

CONCLUSIONES

- Del proceso de fermentación se dio la disminución en el contenido de azúcares, demostrando que el sedimento de aditivo es susceptible a la descomposición por acción microbiológica, lo cual lo hace apto para el proceso de compostaje como sistema de tratamiento.
- El compostaje resulta ser un método apropiado para el tratamiento del sedimento de aditivo, y se demostró su naturaleza orgánica e inocuidad para el proceso. A pesar de que las pruebas sin aditivo mostraron un mejor resultado, son mayores los beneficios tanto ambientales como económicos de tratar el sedimento de aditivo haciendo uso del compostaje, teniendo un cuidado especial en la dosis manejada y en los controles operativos del proceso.
- Para efectos del tratamiento del sedimento de aditivo, la dosis empleada en el ensayo 2 se consideró la óptima, debido a que durante el proceso presentó resultados similares a los ideales según la teoría, y en la evaluación de calidad y madurez final presentó mejores resultados en comparación con los demás ensayos; se hizo el cálculo determinando que en un mes es posible tratar 1687 kg de sedimento de aditivo, valor que supera los 1556 kg de generación promedio mensual, lo que convierte este sistema de tratamiento en una óptima solución de manejo del sedimento de aditivo.
- Los efectos de la aplicación del sedimento de aditivo son más notorios durante el proceso, y se observan efectos directos de la aplicación de las diferentes dosis sobre parámetros como la humedad, la temperatura y el pH de cada uno de los ensayos en el transcurso de la prueba piloto.
- La adición de sedimento de aditivo aumenta el tiempo de descomposición de los residuos compostados, debido a la carga orgánica adicional que aporta para ser descompuesta por los microorganismos y al aumento de humedad que restringe la actividad microbiana por déficit de oxígeno.
- Económicamente es una opción viable dar tratamiento al sedimento de aditivo mediante el compostaje, ya que se disminuyen costos asociados a la disposición, y el producto final es considerado de una buena calidad frente a parámetros de evaluación de madurez como la CIC y la relación C/N y calidad en cuanto a contenido de nutrientes.
- El tratamiento de un residuo industrial generado en grandes cantidades permite la reducción de impactos ambientales producidos por incineración o relleno de seguridad, dando al residuo el potencial de ser utilizado nuevamente en un nuevo proceso, como lo es la producción de abonos orgánicos a través del compostaje.
- Es posible obtener un producto de buena calidad haciendo tratamiento del sedimento de aditivo a partir de un buen manejo y controles operacionales periódicos, lo que posibilita una mayor diversidad de usos del mismo.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con la generación de residuos debe tenerse en cuenta la variación de la dosis de sedimento de aditivo, así como los controles operacionales durante el proceso, teniendo especial cuidado de la posible pérdida de sedimento de aditivo por la lixiviación propia de los residuos orgánicos presentes en la pila de compostaje.
- Debe tenerse cuidado en que no haya pérdidas de nutrientes por el lavado que puede significar el sedimento de aditivo, controlando la dosis aplicada y la forma de aplicación, ya que una aplicación

localizada y acelerada puede generar que el sedimento de aditivo no sea retenido por los materiales y, además, al ser lixiviado, se lleve consigo un contenido de nutrientes importantes de los residuos presentes en la pila de compostaje.

Teniendo en cuenta que el proceso dura 3 meses (1 mes de formación de pila y 2 meses de compostaje de materiales), se recomienda:

- La pila debe formarse máximo en un mes, con la generación diaria de residuos orgánicos.
- El sedimento de aditivo debe aplicarse al cabo de este mes, cuando la tasa de lixiviación propia de los residuos orgánicos haya disminuido y sea casi nula.
- Debe tenerse en cuenta que una vez se entre en la etapa de enfriamiento, en la que el pH sube, y al agregarse el sedimento de aditivo, ya que este tiene un pH ácido, debe aplicarse cal para neutralizarlo.
- Deben aplicarse controles periódicos con el fin de vigilar el progreso de la descomposición que presenta la pila.
- Durante los dos meses siguientes no debe aplicarse material fresco, sino únicamente sedimento de aditivo.
- Al finalizar el proceso, verificar parámetros organolépticos como el olor y el color, físicos como la humedad y la temperatura, y químicos como el pH y el contenido de carbono orgánico y nitrógeno, para determinar la relación C/N y así la madurez del compost.

REFERENCIAS

- Yamiris, T.; Gómez D'Angelo, M., González González, S. & Chiroles, R. (2004). Microorganismos presentes en el compost. importancia de su control sanitario. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista Electrónica de la Agencia Medio Ambiente*, 4(7).
- Campitelli, P.A.; Velasco, S. B.; Rubenacker, M. I. & Andrea, I. (2010). Manual práctico de compostaje. Disponible en: <http://www.libreroonline.com/argentina/libros/302770/paola-campitelli-silvia-ceppi-velasco-manuel/manual-practico-de-compostaje.html>
- Cortés, C. M. (2009). Panorama general de los residuos sólidos en el derecho ambiental colombiano. *Régimen jurídico y ambiental de los residuos sólidos*, 17.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). Norma Técnica Colombiana. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Bogotá: ICONTEC. (NTC 5167).
- Mirabelli, E. (2008). *El compostaje proyectado a la lombricultura*. Hemisferio Sur.
- Moreno Casco, J. & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Madrid: Ed. Mundi-Prensa.
- Porta, J., Acevedo, L. & Roquero, M. C. (1999). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Barcelona: Mundi-Prensa.
- Romero Pinto, M. (2002). El compostaje: una alternativa para la transformación de residuos orgánicos. *Curso de Actualización Profesional Producción Sostenible de Hortalizas, Chía, Cundinamarca (Colombia) 24-26 Jul. 2002: Producción sostenible de hortalizas: curso de actualización profesional*, 66-70.
- Rozo, A. & Chaparro, R. (2005). Implementación de un sistema de manejo de residuos vegetales de floricultura, para obtención de lombricompost en una empresa comercializadora de flores de Bogotá. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H. & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos Sólidos*. Madrid: McGraw-Hill.