

RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES EN FASE SÓLIDA A TRAVÉS DEL COMPOSTAJE

Juan Pablo Silva V. , Piedad López M*., Pady Valencia A.
Escuela de Ingeniería de los Recursos naturales y del Ambiente (EIDENAR),
Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería. A.A. 25360 Cali-Colombia.
pablosil@mafalda.univalle.edu.co*

1. Introducción

El crecimiento demográfico y la industrialización han llevado a reestructurar la manera de cómo las comunidades deben manejar y tratar sus desechos, es así como la visión actual no está basada únicamente en la implementación de Sistemas de Tratamiento para eliminar sustancias indeseables sino que también involucra aspectos asociados a la minimización, prevención, aprovechamiento y reuso de los recursos presentes en dichos desechos.

El compostaje es un proceso biológico aeróbico en el que sustratos orgánicos son oxidados a formas biológicamente estables como el humus. Las aplicaciones más habituales del compostaje son el tratamiento de residuos de la agricultura, residuos de jardín y cocina, residuos sólidos municipales y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En la aplicación de los Sistemas Integrados Sostenibles para el Tratamiento de las Aguas Residuales, la alternativa del compostaje de lodos es promisorio ya que genera beneficios ecológicos, económicos y sociales. En lo ecológico el compostaje minimiza la descarga directa de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento a los cuerpos de agua y ayuda en la recuperación de suelos. En lo económico al obtener un producto comercial como es el compost a partir de un residuo se generan ingresos. En lo social se genera empleo logrando mayor equidad.

El compostaje de lodos primarios con materiales sólidos orgánicos, se compara con el proceso que tradicionalmente realizan los campesinos al mezclar desperdicios de animales con material vegetal con el propósito de ayudar a recuperar la materia orgánica del suelo.

A continuación se presentan los aspectos teóricos básicos relacionados con el compostaje aeróbico, complementados con los resultados obtenidos de una experiencia práctica de compostaje aplicada a los lodos originados en las plantas de tratamiento de aguas residuales en una industria productora de papel.

Palabras Claves: Compostaje aerobio, Biosólidos, Reuso de Lodos Primarios, Sistemas Integrados Sostenibles, Compost, Industria del Papel, Producción más limpia.

2. Generalidades del proceso de Compostaje

El compostaje es un proceso mediante el cual diversos sustratos orgánicos se descomponen y estabilizan debido a la acción de una población mixta de microorganismos, obteniéndose un producto final denominado compost, orgánicamente

estable, libre de patógenos y semillas de malezas que puede ser aplicado de manera eficiente al suelo para mejorar sus propiedades (Haug 1993).

Los objetivos del compostaje han sido tradicionalmente convertir residuos orgánicos putrescibles a materiales estables libres de organismos patógenos para los humanos. El compostaje es también capaz de destruir enfermedades de plantas, malezas, insectos y huevos de larvas. El compostaje contribuye a los procesos de secado de materiales orgánicos de naturaleza húmeda como son los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales, mejorando su manejo y disposición final.

El compost orgánico brinda beneficios ya que es un acondicionador de suelos con características húmicas, libre de patógenos y malezas, que no atrae insectos ni vectores, el cual puede ser manejado y almacenado sin riesgo y benéfico al crecimiento de las plantas. Se han identificado tres funciones fundamentales del compost al aplicarse en suelos:

- ? El compost puede servir como fuente de materia orgánica para mantener o ayudar a la formación del humus del suelo.
- ? El compost puede mejorar el crecimiento de cultivos en la agricultura comercial y usos domésticos. El compost reduce los patógenos que atacan a las plantas y aumentan la resistencia a las enfermedades.
- ? El compost contiene valores apreciables de nutrientes como nitrógeno, fósforo y una variedad de elementos traza esenciales.

Una utilidad adicional del compost es su empleo en la remoción de olores y de Compuestos Orgánicos Volátiles de plantas de tratamiento o procesos industriales, en reactores biológicos denominados Biofiltros.

La descomposición de los sustratos orgánicos a compost puede realizarse de manera aeróbica o anaeróbica.

El proceso aerobio implica la descomposición de los sustratos orgánicos en presencia de oxígeno (aire) obteniéndose como principales productos del metabolismo biológico: dióxido de carbono, agua y calor. El compostaje aerobio ha tenido mayor aplicación dada su mayor flexibilidad, las altas velocidades de estabilización y la relativa fácil operación de los sistemas.

El compostaje anaerobio es la descomposición del material orgánico en ausencia de oxígeno obteniéndose como productos metabólicos finales metano, dióxido de carbono y numerosos compuestos orgánicos de bajo peso molecular como ácidos y alcoholes. Los sistemas de compostaje anaerobio dada su complejidad se utilizan en menor proporción que los aerobios, pero son importantes ya que permiten generar biogás a partir de residuos humanos, animales, agrícolas y residuos sólidos urbanos.

La tabla 1 resume las ventajas relativas de los procesos aerobios y anaerobios.

Tabla 1 Comparación entre los procesos de Compostaje aerobio y Anaerobio. Fuente Tchobanoglous 1994

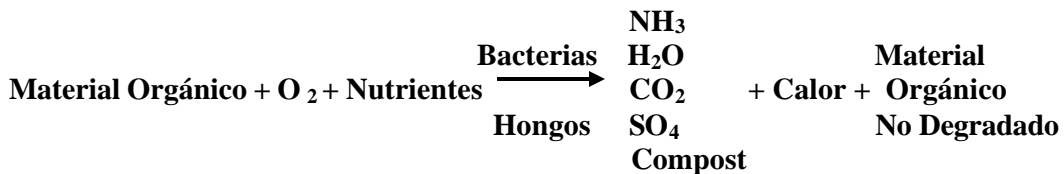
Característica	Procesos aerobios	Procesos Anaerobios
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos finales	Humus, CO ₂ , H ₂ O	Lodos, CO ₂ , CH ₄
Reducción de Volumen	Hasta el 50%	50%
Tiempo de Proceso	20-30 días	20-40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción Energía
Objetivo Secundario	Producción Compost	Estabilización residuos

A continuación se describen las consideraciones teóricas del compostaje aerobio.

3. Compostaje Aerobio

El compostaje aerobio es un proceso de degradación biológica en donde los microorganismos transforman los compuestos orgánicos mediante reacciones metabólicas, en las que se separan los electrones de los compuestos y se oxidan las estructuras de carbono a dióxido de carbono y agua. Nunca se produce una oxidación completa debido a que una parte del material orgánico se transforma y otra no es biodegradable (Eweis et al 1999).

El proceso de biodegradación aeróbica se puede describir mediante la siguiente ecuación:



El proceso de compostaje aerobio ocurre en fases distintas: En la primera de ellas se da una gran actividad de bacterias mesófilicas quienes utilizan gran parte del carbono como fuente de energía expulsando CO₂ y generando calor debido a que las reacciones metabólicas son de naturaleza exotérmica. La generación de calor incrementa la temperatura lo que da paso a una segunda fase, en la cual la materia orgánica alcanza su bioestabilización a través de reacciones bioquímicas de oxidación llevadas a cabo por organismos de naturaleza termofílicas; En la última fase denominada de maduración, la temperatura disminuye actuando mohos y actinomicetes que contribuyen a la estabilidad del compost. (Grossi, 1993; Tchobanoglous, 1994).

3.1 Biología del proceso de Compostaje

En general se puede afirmar que los microorganismos de interés en el compostaje son organismos heterótrofos que utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y desarrollan tejido celular a partir de nitrógeno, fósforo, carbono y otros nutrientes necesarios. Los organismos responsables de la transformación biológica de los materiales orgánicos en compost son los hongos, las bacterias y actinomicetos.

Adicionalmente es común encontrar agentes patógenos en las pilas de compost especialmente cuando se utilizan materiales orgánicos como lodos de aguas residuales domésticas o algunos tipos de residuos agroindustriales.

Durante el compostaje ocurren cambios cualitativos y cuantitativos en la microflora activa. Algunas especies se multiplican rápidamente al inicio cambiando el medio ambiente y luego desaparecen para permitir ser sucedidos por otras poblaciones de microorganismos. Lo anterior es debido a factores selectivos tales como, el contenido de humedad, la disponibilidad de oxígeno, pH, temperatura y la relación C/N(Carbono-Nitrógeno), que determinan la prevalencia y sucesión de la población microbiana.

La Tabla 2 resume la biología y evolución de especies en el proceso de compostaje aerobio.

Tabla 2 Biología del compostaje aerobio

FASE	Tiempo	Temperatura	1E06 UFC/g	1E06 mesofilos/g	1E06 Termofilos/g	Evolución de Especies
Residuos Frescos	> 1 día	Ambiente	8000	8000	0.1	Insectos, Gusanos y Huevos, Protozoarios, semillas de hierbas, Patógenos, bacterias, Hongos.
Fase Mesofílica	15 horas	20 a 50 °C	5000 a 6000	5000	0.2	Eclosión huevos, larvas Huída de insectos, bacterias y hongos mesofílicos
Primera Fase Termofílica	56 horas	50 a 65 °C	40 a 50	5	45	Destrucción huevos de larvas insectos y tenia. Inicia destrucción patógenos, bacterias y hongos termofilos, antibioticos.
Segunda fase Termofílica	12 días	65 a 75 °C	10 a 5	1	12	Destrucción de Patógenos, Salmonella, Bacilos intestinales, Bacterias termofilas y desaparición de hongos
Fase Termofílica Final	15 días	75 a 45 °C	6 a 10	0.5	8	Destrucción final de patógenos. Bacterias termofilas y Actinomicetes.
Maduración	20 días	45 a 25 °C	10 a 20	15	5	Desaparición de Bacterias termofilas y mesofilas, Antibióticos, libre de patógenos.

Bacterias

La mayoría de las bacterias en el proceso de compostaje son aerobias, aunque también existen algunas especies facultativas dependiendo de las condiciones del ambiente en que ocurre la biodegradación del sustrato.

Las bacterias en el proceso de compostaje se pueden clasificar de acuerdo al rango de temperatura en el que se desarrollan: mesófilas para temperaturas entre 20 a 40 °C y termófilas de 40 a 75 °C.

Las bacterias son las responsables de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas a temperaturas termofílicas, así como de gran parte de la energía calórica producida que conduce al incremento de temperatura en el material inicial.

Hongos

Los hongos son muy importantes en la descomposición de materia orgánica compleja y de la celulosa que es una de las partes más resistentes de la materia orgánica, la que en algunos materiales representa hasta el 60 % de la masa total.

Los hongos se destruyen a temperaturas superiores a 55 °C, aunque algunos permanecen en estado de latencia reactivándose en la etapa de enfriamiento del compost.

Kane y Mullins (1973) aislaron diferentes especies de hongos durante las etapas mesofílica y termofílica de un proceso de compostaje de basuras. De 304 especies totales, 120 eran del género *Mucor*, 97 *Aspergillus*, 78 *Humicola*, 6 *Dactylomyces*, 2 *Torula* y 1 *Chaetomium*. Adicionalmente se observó la presencia de hongos en la fase termofílica, a pesar de ello se ha concluido que su crecimiento es limitado y se dificulta aún más si prevalecen condiciones ácidas y anaerobias.

Actinomicetes

Los actinomicetos son un grupo considerado intermedio entre las bacterias procariotas más primitivas y los hongos eucariotas. Su estructura es muy similar a la de los hongos presentando un micelio ramificado, compuesto de hifas unicelulares de diámetro muy reducido y cuando fructifican, este se divide en trozos pequeños, formando verdaderas cadenas igual que las bacterias.

Los actinomicetos pueden resistir condiciones adversas, para su nutrición metabolizan toda clase de materia orgánica (glúcidos, almidones, alcoholes, ácidos orgánicos etc.) generando proteasas, amilasas, lipasas etc.. Forman ácidos orgánicos a partir de los glúcidos y amoníaco a partir del nitrógeno orgánico. Comúnmente producen sustancias antibióticas, las cuales pueden actuar sobre otras especies de actinomicetos, bacterias y hongos.

Algunas especies como los *Thermoactinomyces* pueden crecer a temperaturas de 68 °C y nunca inferiores a 45 °C, resistiendo las temperaturas que ocurren en el proceso de compostaje.

Organismos Patógenos.

Diferentes sustratos utilizados en el proceso de compostaje contienen organismos patógenos que pueden afectar al hombre, a las plantas y a los animales. Martin (1980), afirma que los patógenos más numerosos y peligrosos se encuentran en los lodos de las PTAR. De los diferentes residuos que se utilizan para formar compost, los residuos vegetales son los que contienen menor número de organismos patógenos.

El compost obtenido en un proceso bien controlado minimiza el riesgo de presencia de patógenos, debido a los siguientes factores.

- ? La temperatura alcanzada
- ? El tiempo del proceso
- ? Liberación de amoníaco durante el proceso.

La relación temperatura tiempo es el factor más significativo de la causa de la muerte de los patógenos. En la tabla 3 se presentan las temperaturas y tiempos de exposición para la destrucción de algunos agentes patógenos. Las columnas identificadas como A y B indican el tiempo mínimo al que debe someterse el residuo dependiendo si esta a temperaturas altas o moderadas.

Tabla 3. Temperaturas y tiempos para la destrucción de patógenos

Microorganismo	A		B	
	Temperatura °C	Tiempo (min)	Temperatura °C	Tiempo (min.)
Salmonella Tifosa	55-60	30	60	20
Salmonella sp	55	60	60	15-20
Shigella sp	50	60		
Entamoeba histolítica	45	Pocos Segundos	55	Pocos Segundos
Taenia	55	Pocos Segundos		
Larvas de Trichinella spiralis	50	Pocos Segundos	60	Pocos Segundos
Brucella Abortis	62.5	3		
Escherichia Coli	55	60		15-20
Huevos de Ascaris Lumbricoides	50	60		
MicroBacteria tuberculosis	66	15-20	67	Poco

Fuente Haug 1993

En la tabla 3 se pone de manifiesto que la mayoría de los patógenos serán destruidos rápidamente cuando todas las partes del material de compost están sometidas a una temperatura de aproximadamente 55 °C. Solamente unos pocos pueden sobrevivir hasta

temperaturas de 67 °C durante un corto período de tiempo. Se pueden eliminar todos los patógenos dejando que el material llegue a una temperatura de 70 °C durante 1 o 2 horas.

La capacidad de supervivencia de los patógenos en el suelo y en las plantas se considera fundamental desde el punto de vista de la aplicación agrícola de estos residuos. La supervivencia en el suelo es muy variable y va de pocos días(como es el caso de los quistes de protozoos) a varios años (como los huevos de *Ascaris lumbricoides*). Conviene indicar que los patógenos en el suelo pueden resistir mayores tiempos en ausencia de radiaciones solares, prevalencia de temperaturas bajas y contenidos elevados de agua. Los virus y la mayoría de los parásitos no se multiplican sino que resisten en condiciones adversas.

La EPA (agencia de protección ambiental de los Estados Unidos) reporta que la densidad de coliformes fecales debe ser menor de 1000 NMP por gramo, o densidad de *Salmonella* sp menor de 3 NMP/4g, recomendados para sistemas cuya temperatura mínima de trabajo esta sobre los 50 °C (Haug 1993).

3. Factores que influyen en el Proceso de Compostaje

El proceso de compostaje esta influenciado por los siguientes factores:

3.1 Composición de la materia inicial

El tipo de materia inicial seleccionada en el proceso de compostaje incide en la calidad del producto final obtenido, por lo que se hace necesario un análisis previo que permita establecer características específicas del mismo, tales como contenido en materia orgánica biodegradable, disponibilidad de microorganismos, pH, tamaño de partícula, contenido de nitrógeno, contenido de humedad y contenido de sales.

Diversos materiales son susceptibles de ser transformados en el proceso de compostaje. Pueden citarse como aptos los siguientes grupos de residuos:

- ? Agropecuarios tanto de naturaleza animal como vegetal, incluyendo desechos líquidos como los purines de cerdo.
- ? Urbanos, de carácter sólido(basuras) o líquido (lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales)
- ? Desechos de la madera, como el aserrín y las virutas.
- ? Agro industriales, como azucareros, vinícolas, cafeteros, de conservas vegetales etc.

Es importante tener en cuenta, que la mejor opción al proyectar sistemas de compostaje es elaborar mezclas binarias o ternarias con materiales de diferente origen que tengan características complementarias. De este modo se consigue preparar sustratos con un equilibrio en el contenido de nutrientes, microorganismos y propiedades físicas y químicas que favorecen el proceso y permiten obtener una mejor calidad del compost. (Cegarra , 1996).

El compostaje individual de Biosólidos municipales e industriales se dificulta debido a que estos llegan a contenidos de humedad del 70 a 80%. La presencia de tal cantidad de agua da como resultado en una disminución de la temperatura de compostaje, baja

transferencia de oxígeno y tendencia a compactarse. En este caso la adición de un material esponjante como las astillas de madera y el aserrín previenen la compactación del material, incrementando la porosidad y transferencia de oxígeno al sustrato.

Los sustratos de naturaleza seca, tales como residuos agrícolas y residuos de jardines pueden requerir separación en la fuente, adición de nutrientes, particularmente nitrógeno, reducción de tamaño y adición de agua a la mezcla para evitar limitaciones microbiológicas por escasez de humedad. En este caso se debe utilizar un agente esponjante absorbente que mantenga un alto grado de humedad en el material favoreciendo la actividad microbiológica y fuentes adicionales de nitrógeno.

En el caso de materiales de difícil degradación se hace necesario adicionar una fuente de calor que contenga un alto contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable. Habitualmente se emplea el estiércol de ganado, pollo y caballos; vegetación, como árboles y hojas; y residuos como melazas. (Eweis et al , 1999).

En cuanto al pH del material inicial este debe regularse en valores próximos a la neutralidad en la medida de lo posible. El uso de algunos residuos de pulpas de frutas, especialmente cítricos disminuye el valor de pH al nivel ácido inhibiendo el proceso, mientras que materiales como algunos estercoles presentan características básicas liberándose amonio, lo que trae como consecuencia pérdida de nitrógeno del producto final.

3.2 Tamaño de Partículas

El tamaño de las partículas influye en la densidad, la fricción interna, las características del flujo, las fuerzas de arrastre de los materiales, en la transferencia de oxígeno y en la velocidad de las reacciones bioquímicas.

Tamaños de partículas grandes promueven espacios abundantes por los cuales se dan pérdidas significativas de humedad y menor transferencia de oxígeno lo que disminuye la actividad microbiológica. Por su parte un tamaño excesivamente pequeño de partícula origina problemas de compactación impidiendo una adecuada ventilación.

El tamaño de partícula deseable recomendado por Tchobanoglous (1994) está en el rango de 1cm a 5cm y en el caso de los residuos sólidos estos deben ser troceados, desmenuzados o molidos para ser llevados al tamaño ideal.

3.3 Mezcla e Inoculación

Los materiales seleccionados deben ser homogenizados de manera manual o mecánica, para asegurar igualdad de condiciones del proceso. Se hace necesario verificar a través de análisis de laboratorio si la mezcla cumple con las condiciones de relación C/N y humedad establecidas.

Una forma de mejorar y agilizar el proceso de compostaje consiste en adicionar inoculos que contienen microorganismos como bacterias, hongos, levaduras y actinomicetes que aceleran la descomposición de la materia orgánica reduciendo el tiempo de biodegradación.

El inóculo seleccionado depende del material compostado, por ejemplo los lodos de aguas residuales por ser ricos en nitrógeno pueden inocularse con residuos sólidos urbanos ricos en carbono. En el caso de residuos sólidos orgánicos el inóculo puede ser compost fermentado, compost maduro, estiércoles y rumen entre otros. (Castro 1995).

El compost fermentado es el inóculo obtenido a los 20 días del proceso de compostaje y es rico en una gran diversidad de microorganismos ya que su actividad bacteriana es máxima.

El compost maduro es el producto final del proceso de compostaje, es un producto estabilizado y rico en microorganismos útiles.

El estiércol es el inóculo tradicional de aporte de materia orgánica y nutrientes. Entre los estiércoles corrientemente utilizados están la gallinaza, que es un material orgánico parcialmente descompuesto resultante del estiércol de galpones (cobertizo para la cría de aves de corral) y que contiene gran cantidad de microorganismos y nutrientes. Igualmente se emplean los estiércoles tradicionales de granja elaborados a base de paja y los purines obtenidos de diluir las excretas animales con el agua de limpieza de establos.

Dentro del proceso de compostaje con inóculo se distinguen las siguientes ventajas:

- ? El tiempo requerido para la maduración del compost disminuye
- ? La inoculación mejora la velocidad de las reacciones bioquímicas mejorando la biodegradación y estabilización del sustrato.
- ? Aumenta y favorece el crecimiento de microorganismos útiles para el suelo, así como los nutrientes.

3.4 Humedad

El control de humedad es un factor importante en el desarrollo del proceso de compostaje ya que incide en el crecimiento bacteriano, debido a que los microorganismos requieren agua para cumplir con sus necesidades fisiológicas y no pueden sobrevivir en ausencia de esta.

El contenido óptimo de humedad de los materiales para el compostaje es 50-60%. Cuando el contenido de humedad está por debajo del 30% en peso, las reacciones biológicas en una pila de compost se retardan considerablemente y la elevación de temperatura se limita; por debajo del 12% cesa prácticamente toda actividad biológica, siendo el proceso extremadamente lento. En contraste una humedad superior al 60% causa la saturación de la materia orgánica, todos los espacios vacíos son ocupados por el agua, desencadenando olores desagradables, descenso de la temperatura, lavado de nutrientes y prevalecen condiciones anaeróbicas. (Castro 1995)

En los procesos aeróbicos el contenido de humedad está estrechamente relacionado con los requerimientos de oxígeno. Si el contenido de humedad es demasiado alto los espacios entre las partículas del material se saturan de agua, impidiendo el movimiento de aire dentro de la pila.

3.5 Temperatura

La temperatura de la masa de los materiales sometidos a compostaje sufre alteraciones durante las diferentes fases del proceso debido a la interacción de diferentes grupos de microorganismos. En pocos días, de dos a seis, se llega a temperaturas mayores a 45 °C ya que el metabolismo de los microorganismos es exotérmico, por lo tanto en el proceso de descomposición hay liberación de calor originándose un aumento de la temperatura.

En el proceso de compostaje, la mayoría de los microorganismos se desarrollan a temperaturas entre 35 y 55 C. Al alcanzar temperaturas entre 60 – 70 C, se garantiza la eliminación de semillas de malezas y muchos patógenos que están presentes en el material a compostar (Lopez 1995).

En la figura 1 se muestra la curva normal temperatura tiempo en una pila de compost, identificando las diferentes etapas que se desarrollan durante el proceso y el tipo de microorganismos que prevalecen en ellas.

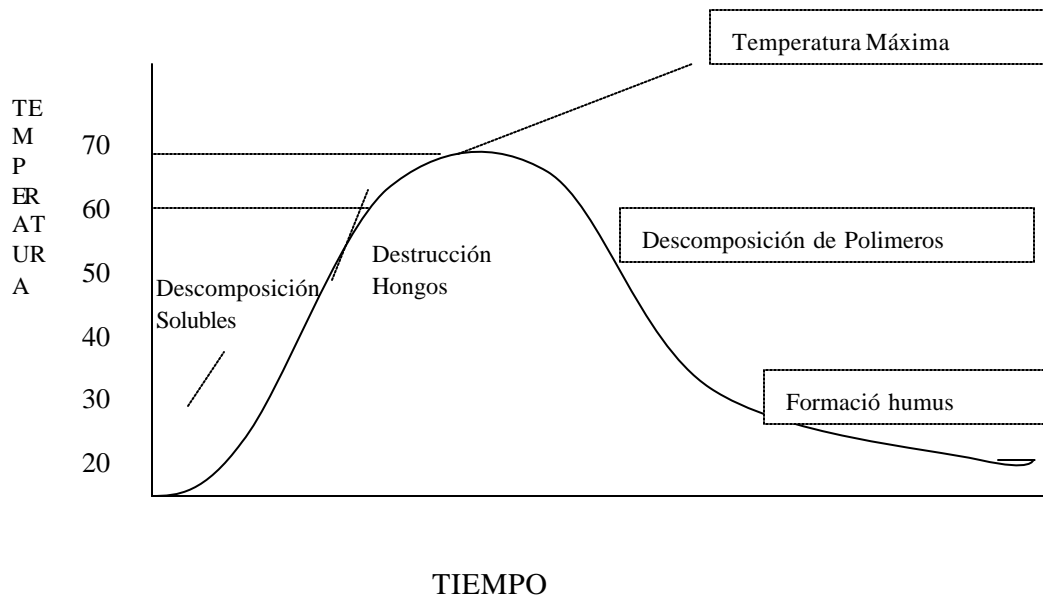


Figura 1 Comportamiento de la Temperatura en el Compostaje aerobio

Al inicio del proceso, el material se encuentra a temperatura ambiente. En la primera etapa denominada mesofílica, se da un calentamiento gradual debido a la biodegradación del sustrato, los microorganismos presentes en el material se multiplican rápidamente y la temperatura se eleva hasta valores promedio de 45°C . Durante este período se descomponen compuestos como azúcares, almidones y grasas.

Cuando la temperatura alcanza los 60 °C, se presenta la etapa termofílica, en ella la actividad de los hongos cesa y la descomposición es llevada a cabo por los actinomicetos y las cepas de bacterias que forman esporas. La velocidad de descomposición se modera y se alcanza el máximo de temperatura. En esta etapa se degradan ceras, proteínas, hemicelulosas y algo de lignina y celulosa. Se evita superar

los 70°C ya que el proceso se convierte en una ignición en el cual se empobrece en extremo la sustancia orgánica. . (Dalzell et al., 1991).

Pasada la etapa termofílica la temperatura desciende gradualmente hasta casi nivelarse con la temperatura ambiente, bajo estas condiciones, los hongos termofílicos que sobrevivieron a las temperaturas más calientes de la pila realizan la degradación de la celulosa.

La temperatura del proceso solo puede ser controlada indirectamente, variando la frecuencia de volteo, normalmente esta cae de 5 a 10 °C después de su volteo, regresando a las pocas horas a su valor anterior.

Estas tres etapas transcurren durante semanas, a lo largo de períodos más o menos largos que dependen de las características de los residuos utilizados. El tiempo total que pasa desde la construcción de la pila hasta la madurez dependerá de la naturaleza de los materiales orgánicos, de las condiciones de aireación y humedad en la pila y de las condiciones ambientales (Dalzell et al., 1991).

3.6 Aireación

El aire suministrado en un proceso de compostaje cumple tres propósitos fundamentales:

? *Satisfacer la demanda de oxígeno necesaria para la descomposición del material orgánico presente en el material compostado:* La cantidad de oxígeno presente en el proceso de compostaje limita la velocidad de descomposición de los residuos ya que este es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios y para oxidar determinadas moléculas orgánicas de la masa de fermentación, por ende es un factor determinante en la calidad del compost final.

Una transferencia deficiente de oxígeno, lleva a la sustitución de los organismos aerobios por anaerobios, lo que retarda el proceso en tiempos hasta de 4 a seis meses. Adicionalmente se presentan problemas relacionados con la generación de olores.

? *Regular el contenido de humedad del sustrato a través del secado:* El aire suministrado en el proceso arrastra parte de la humedad del material sometido a compostaje, ayudando a su secado. Este fenómeno es importante especialmente cuando se utilizan materiales de elevada humedad como lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

? *Remoción del calor generado durante la descomposición orgánica con el propósito de controlar el proceso de aumento temperatura.* Un aumento incontrolado de la temperatura influencia la actividad microbiológica en el proceso de compostaje, ya que este depende de la evolución completa de todo un ecosistema microbiano y no de una especie única, por ejemplo a Temperaturas superiores a 70 °C afectan a las bacterias termofílicas lo que no es beneficioso para completar el ciclo del compost. El aire suministrado previene la anterior situación.

El aire en los sistemas de compost puede ser suministrado mediante volteo del material o empleando compresores y/o sopladores. El sistema usado depende de la tecnología de compostaje seleccionada, que se discute en un apartado posterior.

3.7 pH

El valor del pH óptimo para el compostaje esta entre 6.5 y 8.0. Si el grado de descomposición no es adecuado, el pH puede caer a valores entre 4 – 5, retrasandose el proceso.(Tchobanoglous, 1994).

El pH del material fermentado varia en el desarrollo del proceso así: durante los primeros días del compostaje el pH cae a 5 o menos. Durante esta etapa el material orgánico se encuentra a temperatura ambiente, comienza la reproducción de microorganismos mesófilicos y sube rápidamente la temperatura. Entre los productos de esta etapa inicial están los ácidos orgánicos simples que causan la caída del pH. Después de aproximadamente tres días, la etapa llega a la temperatura termofílica y el pH debe subir de 8 a 8.5 unidades. El pH cae ligeramente durante la etapa de enfriamiento y llega a un valor entre 7 a 8 en el compost maduro (Moretti, 1986)

3.8 Relación Carbono/Nitrógeno

En el proceso de compostaje el carbono es la fuente de energía utilizada por los microorganismos para la activación de sus procesos metabólicos, mientras que el nitrógeno, es el material básico para la síntesis de material celular, por lo tanto la relación C/N es uno de los aspectos más importantes en el balance nutricional del compost. Es deseable que la relación C/N este en el rango de 25:1 a 50:1 en la mezcla inicial (Tchobanoglous, 1994).

Un exceso de carbono asociado a valores altos de la relación C/N, limitan la síntesis de material celular por parte de los microorganismos disminuyendo su crecimiento y retardando el proceso de estabilización de la materia orgánica. Si por el contrario, la pila esta compuesta de elementos ricos en nitrógeno se puede presentar solubilidad y posterior perdida de este compuesto en forma de amoniaco gaseoso, lo que no es conveniente ya que en el material final se pierde este valiosos elemento.

La relación C/N se considera como un indicador del grado de avance del proceso, así al inicio del proceso esta relación deb ser del orden de 30:1 y al final cuando se alcanza la maduración del compost puede ser de 10:1 (Tchobanoglous 1994).

Los desechos disponibles para el compostaje con relaciones altas de C/N altas pueden ser mezcladas con el estiércol líquido de los establos, la harina de huesos, la harina de pezuñas y cuernos, y las tortas de aceite y sangre seca, ya que suministran nitrógeno, potasio y elementos traza,. También se pueden utilizar fertilizantes nitrogenados orgánicos tales como la urea y el nitrato amonico (Dalzell et al 1991).

En la tabla 4 se presentan los contenidos de carbono y nitrógeno para diversos materiales.

Tabla 4 Relación Carbono/Nitrógeno de materiales útiles para compostar.

Material	%Nitrógeno Base seca	Relación C/N
Orina de animales	15-18	0.8
Sangre seca	10-14	3
Harina de Pescado	4-10	4-5
Torta de semilla Oleaginosa	3-9	3-15
Lodos Activados	5-6	6
Gallinaza	4	Nd
Hierba Fresca	2-4	12
Desechos de Cervecería	3-5	15
Basura Urbana	0.6-1.3	10-16
Aserrín fresco	0.1	500

4.0 Tecnología del Compostaje Aerobio

En el compostaje aerobio se presentan principalmente tres tipos de sistemas: Hileras, pilas estáticas y reactores cerrados. Las hileras y las pilas estáticas, que en ocasiones se citan como sistemas abiertos, se emplean más que los reactores cerrados. En los sistemas abiertos el material a compostar se apila en una plataforma impermeable, como hormigón o asfalto. A veces se usa una capa de polietileno como precaución extra para asegurar que ningún contaminante alcance el suelo a través de las grietas, en el caso de que existan.

El modo de aireación es lo que diferencia las hileras de las pilas estáticas. En la explotación de una hilera se airea la pila volteando la mezcla de compost, manual o mecánicamente. En las pilas estáticas se utiliza la aireación forzada, colocando un sistema de tubos perforados en la base de la pila a través de los cuales circula el aire. La aireación puede ser de cabeza positiva si el aire es impulsado, o de succión negativa si se aplica vacío. En el sistema cerrado la mezcla se acomoda en un reactor y la homogenización y aireación se hacen por volteo y aireación forzada.

4.1 Compostaje en Hileras

El nombre de este tipo de compostaje corresponde a la manera de apilar el material a compostar, el cual se coloca sobre unas plataformas en grandes montones o hileras. Su tamaño influye en el rendimiento de una pila de compost. Para mantener altas temperaturas en la hilera, la pila de compost debe ser lo suficientemente grande para permitir que el calor generado por los procesos metabólicos exceda a las pérdidas de calor de las superficies expuestas. En la hilera se retendrá mucho calor debido a su gran área transversal y a la pequeña relación superficie - volumen (Hay y Kuchenrither, 1990). La temperatura de la hilera puede controlarse volteando la pila, lo que también proporciona aireación. El ancho de la pila se sitúa normalmente entre 3 y 4 m mientras que la altura puede llegar a 1.2 y 1.5 m (Cookson, 1995). Ver figura 2.

El método de aireación empleado depende del tamaño de las hileras. La mezcla manual se hace empleando una pala o instrumento que permita el volteo del material. La mezcla mecánica se hace con una máquina volteadora. En el primer caso se requiere un trabajo intensivo de un operario, los costos son menores pero la eficiencia de la mezcla esta

limitada. En el segundo caso los costos son más elevados pero la aireación y mezcla son mejores.

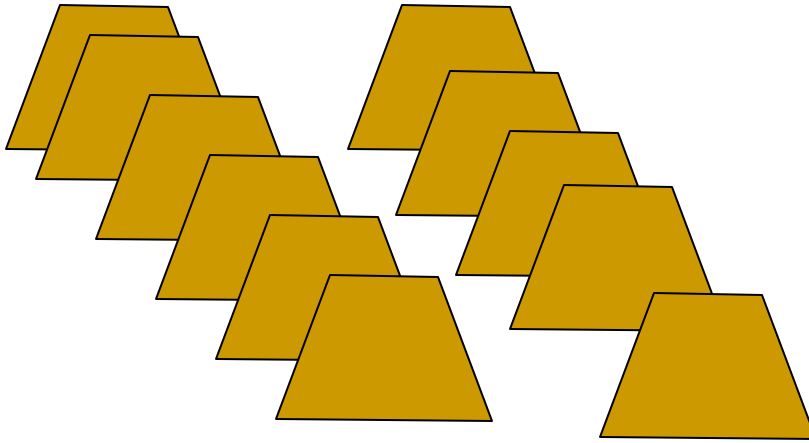


Figura 2. Compostaje en Hilera

La frecuencia del volteo depende de los objetivos a cumplir. En primer lugar el volteo se hace para airear la pila y/o disipar calor y reducir la temperatura. Un perfil de temperatura típico se presenta en la figura 3. La diferencia de temperaturas entre las zonas y el tamaño de cada una depende en cierta forma de la frecuencia de volteo. Este ayuda a redistribuir el perfil de temperatura para que las capas superiores que están a inferior temperatura se expongan a las altas temperaturas del nivel interior. Las hileras se voltean en frecuencias que oscilan entre una vez por día hasta tan poco como una vez por mes, e incluso en algunos casos nunca en toda la duración del tratamiento.

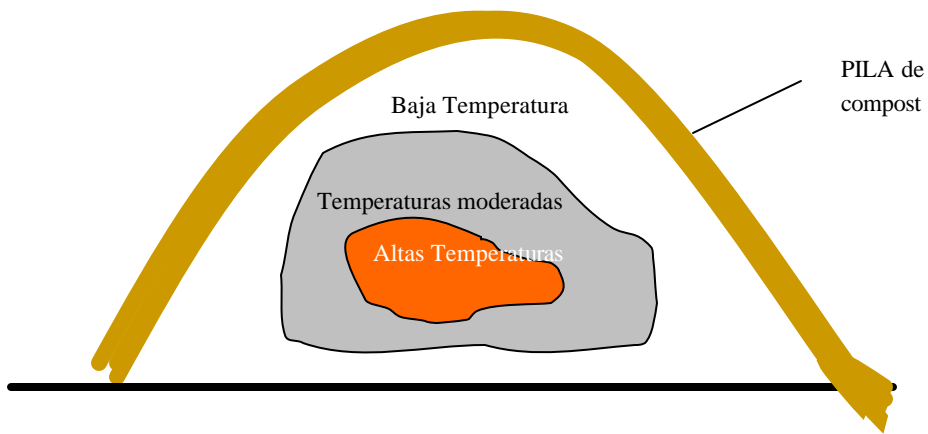


Figura 3. Perfil de Temperatura en una pila de Compost

Las pilas que no se voltean dependen, para mantener la condiciones aerobias de lo que a veces se denomina aireación pasiva, que es el resultado del incremento de temperatura en el interior de la pila y del gradiente de temperatura resultante entre el interior de la

pila y la atmósfera del ambiente que origina un flujo convectivo fuera y dentro de la pila. Dicha aireación esta limitada por la porosidad de la matriz y la profundidad de la pila. La capa exterior que esta expuesta a la atmósfera podría tener altas concentraciones de oxígeno mientras que las capas interiores podrían tener cierto deficit de oxígeno. Si las dimensiones de las pilas son suficientemente grandes, la difusión del oxígeno a través de las capas exteriores será utilizada antes de que el oxígeno puede alcanzar el interior de la hilera.

Generalmente el compostaje en hileras se lleva a cabo en entornos abiertos por lo que se hace necesario construir una infraestructura que proteja las pilas de la lluvia, la erosión del viento, mantenga la temperatura en el interior de la pila y controle la emisión de olores y compuestos orgánicos volátiles peligrosos. En algunos casos se emplean materiales de cobertura sobre las pilas de tipo sintético o alguna capa de materia orgánica como compost maduro o residuos de césped.

4.2 Pilas Estáticas

En esta configuración el material a compostar se coloca sobre un sistema de tubos perforados conectados a un soplador o a una bomba de vacío. Generalmente se prefiere la aireación inducida por vacío debido a la minimización de las emisiones de compuestos volátiles y gases generadores de olor, aunque en climas fríos no es lo más aconsejable principalmente porque el aire frío succionado puede hacer descender la temperatura de las pilas, especialmente en capas exteriores.

En las pilas estáticas el flujo de aire se usa para controlar tanto la temperatura como la cantidad de oxígeno en el interior de la pila. El trazado de los tubos perforados y la tasa de aireación empleados son parámetros de diseño básicos en las pilas estáticas. Los tubos en la base estan inmersos en una capa de material muy permeable como grava, arena, virutas de madera o compost. La capacidad para airear una mezcla estática sin alterar la mezcla de compost permite diseñar sistemas con dimensiones superiores a las de las hileras la literatura reporta alturas hasta de 3 m, reportandose incluso alturas de 6 m (Cookson, 1995). (ver figura 4)

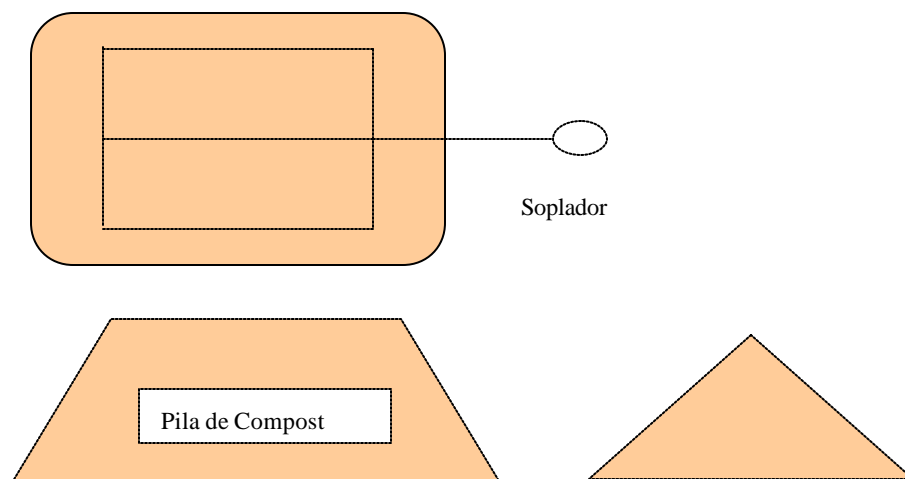


Figura 4 Pilas Estáticas

4.3 Reactores Cerrados

El compostaje en reactores cerrados aunque precisa de costos elevados de inversión proporciona el mayor control de proceso y tiene varias ventajas sobre los sistemas abiertos. Los reactores cerrados se equipan, generalmente, con mecanismos combinados, diseñados para permitir frecuentes sino continuas mezclas de residuos (Tambores rotatorios, tanques o cámaras de mezcla). La mezcla genera la distribución del sustrato en la masa sometida a compostaje, lo que conlleva a un mejor contacto con los microorganismos, incrementándose el potencial de biodegradación.

Los reactores cerrados también proporcionan un mejor control de las emisiones al aire. Los compuestos volátiles orgánicos, así como los olores desagradables, están confinados y pueden tratarse separadamente. Como la pila no está expuesta a la atmósfera, se minimiza la disipación de calor y el control de la temperatura y de la oxigenación pueden lograrse mediante la aireación forzada. Al mismo tiempo el entorno cerrado permite mantener el contenido óptimo de humedad, así como la eliminación de los lixiviados previniendo la contaminación del suelo y las aguas subterráneas en el área de tratamiento.

5. Producto final Compost

El compost no es un fertilizante propiamente dicho pero es un material comparable a un suelo de alta calidad debido a su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. La principal aplicación del compost se da como enmienda del suelo en la mejora de tierras pobres ya que aporta materia orgánica, retiene agua y libera gradualmente nutrientes, mejorando los cultivos. (Cotes 1995). En general el compost actúa en el suelo de la siguiente forma:

- ? Renovando y aumentando la "vida" del suelo al promover la proliferación de microorganismos y biota útil que participan en los procesos de humificación.
- ? Incrementando la retención de agua optimizando los sistemas de riego y amortiguando las etapas de sequía.
- ? Favoreciendo la porosidad, lo que permite una mejor aireación del suelo.
- ? Mejorando la capacidad de intercambio iónico en el suelo.
- ? Aumentando la eficiencia de los fertilizantes y reduciendo la contaminación.

Aunque son muy diversos los posibles usos del compost en la agricultura, su valor se resume en cuatro variantes, (Lopez 1995)

- ? Abono o fertilizante si el compost aporta nutrientes al suelo.
- ? Enmienda húmica de mantenimiento cuando evita la pérdida de materia orgánica del suelo.
- ? Enmienda húmica de corrección cuando aporta materia orgánica al suelo
- ? Sustrato de cultivo cuando se utiliza como soporte total o parcial de los cultivos.

La calidad final del compost debe basarse en aspectos que aseguren su comercialización y cumplan con estándares que protejan el ambiente y la salud pública.

Los riesgos asociados a la salud humana en las instalaciones de compostaje provienen de la exposición a patógenos humanos, aerosporas y vectores. Los patógenos primarios existe en el material inicial y los patógenos secundarios crecen durante el proceso de compostaje. Respecto a los primeros se espera que las altas temperaturas alcanzadas

durante el proceso los eliminen. Los patógenos secundarios principales son las esporas formadoras de ciertos tipos de hongos, que pueden circular vía aérea en los sistemas de compostaje.

El compost final debe someterse a un control microbiológico y este debe ser más estricto conforme al empleo que se da al producto y al contacto con el hombre. Los requerimientos básicos exigen ausencia de Salmonella, no deben contener huevos de parásitos y el límite máximo de coliformes fecales es 10×10^6 UFC/ gr.

Algunos sustratos orgánicos sometidos a compostaje pueden tener contenidos apreciables en metales pesados y algunos compuestos orgánicos traza, ocasionando restricciones en la calidad final del producto ya que estos elementos pueden penetrar en la cadena alimenticia a través de las plantas, potencializando cierto grado de toxicidad en humanos, animales y plantas.

Las soluciones más aceptadas para regular este problema se basan en el control de la composición final del compost y en la restricción de los usos o aplicaciones del compost. La EPA regula el compost basado en lodos bajo el mercadeo y la distribución en el Acta de agua Limpia parte 503. La tabla 5 resume estos límites. Las concentraciones reportadas se basan en evaluaciones del riesgo a la salud de diferentes rutas de exposición. El compost basado en lodos que cumplen estos límites y estándares en cuanto a patógenos y vectores se consideran de excepcional calidad y pueden ser usados sin restricciones.

Tabla 5 Concentraciones Límites de metales en Compost

Elemento	Concentración mg/ Kg peso seco
Arsenico	41
Cadmio	39
Cromo	1200
Cobre	1500
Plomo	300
Mercurio	17
Niquel	420

Fuente EPA Parte 503

En cuanto a otros tipos de materiales utilizados en el compostaje como son los residuos sólidos domiciliarios, residuos de jardín, estiércoles y residuos agroindustriales también son susceptibles de este tipo de regulaciones.

En cuanto a las características del compost importantes para su comercialización están el contenido en materia orgánica, su color, tamaño de partícula, la ausencia de malezas y otras asociadas a materiales inertes como piedras, vidrio, plástico, relación carbono nitrógeno, salinidad, pH, contenido de humedad y capacidad de retención de agua. Las malezas son indeseables y deben destruirse en la fase termofílica.

Debido a que el compost es un aportador de materia orgánica más que de nutrientes, su calidad está definida con base en este parámetro. Datos proporcionados por la asociación Alemana para la calidad del compost, establecen como valor medio de materia orgánica un 33.4% respecto a la materia seca.

El color del compost varia de un marrón claro hasta un marrón oscuro, dependiendo del grado de maduración.

El tamaño de partícula debe garantizar que al mezclarse con el suelo se favorezcan los procesos de aireación.

Se puede hablar de un contenido mínimo de nutrientes, en cuanto al nitrógeno ester puede oscilar alrededor del 3% y es importante que no sea inferior a 0.6. El nitrógeno amoniacal al final del proceso no debe exceder de 0.04%, puesto que su presencia en mayor proporción denota un material pobremente estabilizado. El potasio alcanza valores cercanos a 1 %, mientras que el fósforo raramente supera este mismo valor.

En cuanto al pH el intervalo recomendado es entre 6.5 y 8 unidades, lo que es compatible con el crecimiento de la mayoría de cultivos. En algunos casos el compost tiene la capacidad de actuar como tampón estabilizando el pH del suelo.

La presencia de materiales extraños como piedras, vidrios y plástico limitan la comercialización del compost, por lo cual es preferible hacer separación en la fuente original donde se ocasionan estos residuos.

6. COMPOSTAJE DE LODOS PRIMARIOS GENERADOS EN UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio preliminar del Compostaje de lodos primarios generados en un proceso de fabricación de papel, utilizando cinco sustratos compuestos por: lodo únicamente; lodo y urea; lodo, urea y residuo orgánico de origen vegetal; lodo, urea, residuo orgánico vegetal y ripio de madera; y lodo, urea, residuo vegetal, ripio de madera y carbonilla. Para cada sustrato se trabajaron dos relaciones carbono-nitrógeno, 25 y 50 respectivamente; variando la cantidad de urea en cada pila. Durante todo el proceso se hizo seguimiento a variables como: temperatura, pH, humedad y materia orgánica. Al final el proceso (estabilización de la temperatura), se hicieron pruebas de laboratorio para establecer las características del compost y ver su aplicabilidad.

Se estableció que para compostar el lodo primario de la industria papelera hay que combinarlo con un residuo de fácil degradación: cáscaras de frutas y verduras, y adicionarle una fuente externa de nitrógeno: urea.

6.1 METODOLOGIA

Selección y caracterización de materiales a compostar

Se hizo una clasificación de todos los residuos generados durante el proceso de fabricación de papel y se escogió aquellos que eran de origen orgánico: lodos primarios, que son los sólidos sedimentables de la etapa de clarificación de las aguas residuales; cáscaras de frutas y verduras provenientes de la preparación de alimentos; aserrín que

sale como rechazo durante la formación de astillas a partir de la madera; y carbonilla o cenizas de carbón, que resultan de la obtención de vapor a partir de carbón mineral.

Luego se realizó una caracterización de cada uno de ellos, los valores se muestran en la tabla 6:

Tabla 6 Caracterización de materiales a Compostar en el proceso

Parámetro	Lodo	Cáscaras	Aserrín
Humedad (%)	30	85,9	57,8
Nitrógeno (%)		0,25	
Carbono (%)	18,7	0,71	0,7
pH	8 - 9	5	7,2
Relación C:N		22,1	300

Adicionalmente se hizo un análisis de metales pesados en el lodo primario (Tabla 7):

Tabla 7 Análisis de metales pesados en el lodo primario

Elemento	ppm (peso)
Cadmio	0,5
Cromo total	6,7
Plomo	13,2
Níquel	13,7
Zinc	23,5

Selección de sustratos para compostar

Se escogieron cinco sustratos, a saber: lodo que se tomó como el blanco; lodo y urea; lodo y cáscaras; lodo, cáscaras y aserrín; y lodo cáscaras, cáscaras, aserrín y carbonilla.

Selección de la relación carbono – nitrógeno (C/N)

Se decidió trabajar con dos relaciones C/N, para cada sustrato: 25 y 50. Para ello se varía la cantidad de nitrógeno en cada uno de los sustratos. Las mezclas se realizarán a partir de un análisis de balance de masas

Diseño y montaje de las pilas

La forma de las pilas fue cónica con 0,5m de alto y 1,40m de base. Inicialmente se forma una pila que se denomina inoculo, que es una mezcla de todos los materiales: lodo: 20%, cáscaras: 50%, aserrín: 20% y carbonilla: 20%. Una vez se alcanza una temperatura superior a los 50°C, se forman las otras pilas y se le adiciona una parte de semilla a cada una (20%, en peso de cada pila).

Manipulación de las pilas

Inicialmente el requerimiento de oxígeno es alto, por lo que se las pilas se voltean manualmente dos veces al día durante los primeros cinco días, luego una vez al día hasta que la temperatura en el centro de la pila alcanza los 50°C, después el volteo depende de la interrelación entre la humedad y la temperatura de la pila.

Monitoreo de las pilas

Desde el inicio del proceso se hizo seguimiento a variables como temperatura, pH, cenizas, materia orgánica y humedad. Para medir la temperatura se usó un termómetro metálico de carátula, con un bulbo de 60cm. Se escogieron 5 puntos en cada pila para tomar la temperatura, uno en el centro y cuatro a los lados. La temperatura se midió todos los días hasta que estabilizó.

Los análisis para las otras variables se hizo dos veces por semana, para ello se utilizaron métodos propuestos por el Estándar Methods for the Examination of Water and Wastewater, corregido para suelos.

Una vez terminó el proceso (estabilización de la temperatura), se hizo una caracterización del compost para conocer la composición de nutrientes y contenido de coniformes fecales.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se tomó la temperatura de 5 puntos en cada pila, se observó que la temperatura en el centro es mayor y desciende a medida que nos acercamos a la superficie, en donde es igual a la temperatura ambiente. Este comportamiento se debe a que el calor transferido por conducción desde el centro de la pila hacia la superficie se pierde por convección cuando hace contacto con el ambiente.

El comportamiento es similar para todas las pilas. En la figura 5 se muestra el comportamiento de la temperatura del centro de la pila para cada uno de los sustratos.

El blanco corresponde a la pila de lodo, C1 a lodo y urea con relación carbono-nitrógeno =25; C1' a lodo y urea con relación carbono-nitrógeno =50; C2 a lodo, cáscaras y urea con relación carbono-nitrógeno =25; C2' a lodo, cáscaras y urea con relación carbono-nitrógeno =50; C3 a lodo, cáscaras, aserrín y urea con relación carbono-nitrógeno =25; C3' a lodo, cáscaras, aserrín y urea con relación carbono-nitrógeno =50; C4a lodo, cáscaras, aserrín, carbonilla y urea con relación carbono-nitrógeno =25; C4' a lodo, cáscaras, aserrín, carbonilla y urea con relación carbono-nitrógeno =50; y meta corresponde a 55°C, que es la temperatura que se debe alcanzar durante la etapa de degradación para garantizar una buena higienización del compost maduro.

Al inicio del proceso de Compostaje, las pilas se encuentran a temperatura ambiente luego se presenta una etapa de adaptación en donde se da un aumento gradual. Este incremento en la temperatura ocurre de forma lenta debido a que la población microbológica debe adaptarse al tipo de sustrato de cada pila. Luego la temperatura sube rápidamente hasta alcanzar la etapa termofílica, la cual dura entre 5 y 15 días dependiendo de la composición de cada pila.

La etapa de estabilización comienza a los 40 días aproximadamente para todas las pilas. El pico que se observa en las pilas C1 y C1', se debe a que se les adicionó una pequeña cantidad en descomposición par ver su efecto. Puede verse que aumenta la temperatura inmediatamente y vuelve a descender, se puede decir que en estas pilas no se realizó una descomposición considerable de la materia orgánica, la cual pudo darse dado que no tenia material que fuera rápidamente degradado y a su vez permitiera el desarrollo de las bacterias termofílicas.

PERFIL DE TEMPERATURA

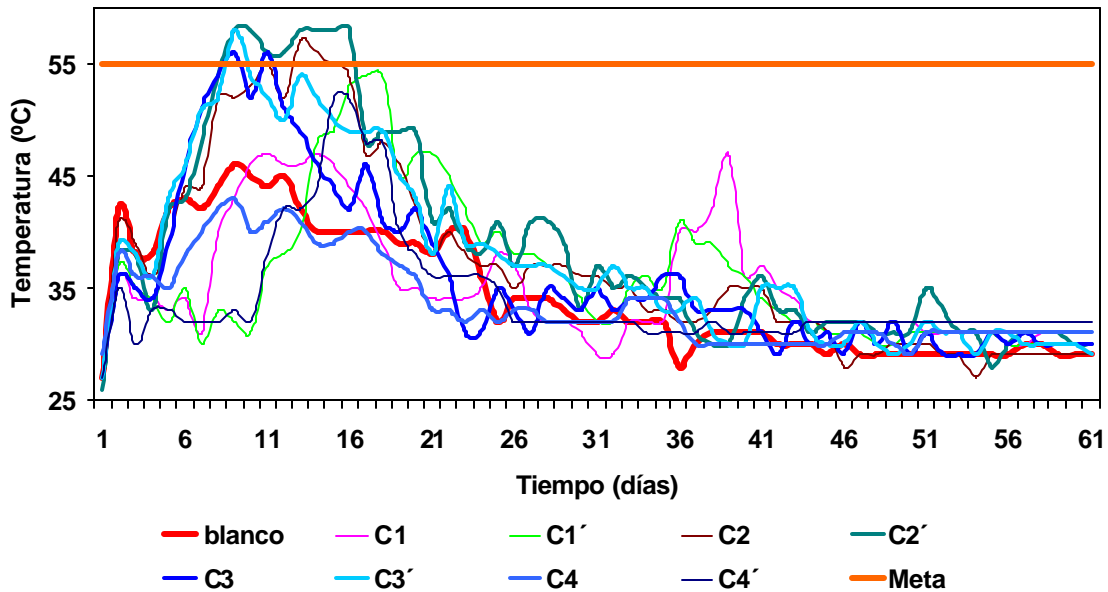


Figura 5 Comportamiento de la temperatura en el compostaje de diversos sustratos

La temperatura en la pila depende de las condiciones en cada una de ellas, humedad (mayor del 50%), oxígeno suficiente dado que es un proceso aerobio, nutrientes y materiales de fácil degradación que permita el desarrollo de los microorganismos. Al comparar los perfiles de temperatura de las relaciones C/N = 25 y 50 para cada sustrato, se encontró que las pilas con relación C/N =50, alcanzó temperaturas superiores a aquellas con C/N = 25. En la figura 2, se compara los perfiles de temperatura del blanco y las pilas con relación C/N =50, durante los primeros treinta días que se da la etapa de degradación por parte de las bacterias termofílicas.

Puede verse que la pila C2' (lodo, cáscaras, aserrín y urea), alcanza los 55°C más rápido que las otras y se mantiene aproximadamente diez días por encima de este rango. Las pilas que mayor tiempo de adaptación presentaron fueron las C3' y C4', lodo, cáscaras, aserrín y urea; y lodo, cáscaras, aserrín, carbonilla y urea. Estas pilas no alcanzaron los 55°C, sí consideramos el hecho de que todas las pilas tienen la misma cantidad de lodo y cáscaras, el descenso en la temperatura puede estar debido a la incorporación del aserrín y la carbonilla que aportan porosidad a la matriz de compost y permiten mayor aireación entre las pilas, haciendo que la temperatura disminuya en las pilas.

La humedad al inicio del proceso se encuentra entre 65 y 70%, luego empieza a descender, lo que puede ser debido a pérdidas por evaporación y a la actividad de los microorganismos. Se observó que la humedad tiene una estrecha relación con la temperatura desarrollada en cada pila, prueba de ellos es que los descensos en las gráficas de perfil de temperatura corresponde a condiciones antes del volteo y la adición de agua; y los ascensos a días siguiente a dicha actividad.

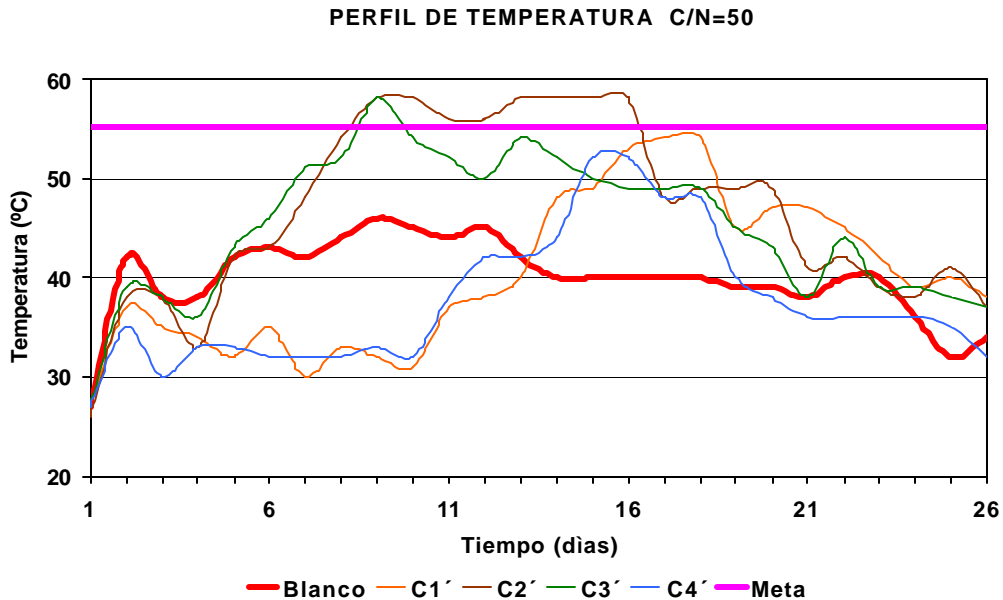


Figura 6. Comportamiento de la temperatura a diferentes relaciones C/N

El comportamiento de la materia orgánica es similar para todas las pilas, durante los primeros 30 días (etapa termofílica) que es donde se presenta la mayor actividad microbiológica, se observó una disminución notable en el contenido en cada pila, una vez termina este período empieza el enfriamiento y la velocidad de descomposición de la materia orgánica es menor. La disminución de la materia orgánica puede estar dada a la conversión de la materia en bióxido de carbono y agua.

Durante los primeros diez días se presenta una generación de olores en las pilas que contienen urea, esto pudo darse debido a que los microorganismos empiezan a asimilar los nutrientes necesarios pero como el nitrógeno no está ligado a la materia sino que proviene de una fuente externa, queda en exceso y empieza a volatilizarse en forma de amoníaco o nitrato, de acuerdo al proceso de nitrificación que sufre la urea al ser aplicada al suelo. (Bockman et al., 1993).

Un aspecto importante es que el volumen de cada pila disminuyó entre un 29 y 74%, dependiendo del tipo de sustrato. La pila que presentó una mayor reducción fue S2' (lodo, cáscaras, y urea con C/N =50), de 74% de su volumen inicial (en peso).

Calidad del compost obtenido: se recurrió a los parámetros establecidos por la Environmental Protection Agency (E.P.A), para determinar la aplicabilidad del compost obtenido, de acuerdo a sus características.

Los factores a considerar para conocer la calidad de un compost son el contenido de nutrientes, metales pesados y la densidad de coliformes fecales. Un compost maduro debe contener trazas y elementos esenciales, de los cuales los más importantes son nitrógeno, fósforo, potasio y azufre. Estos valores dependen de las concentraciones iniciales en los materiales usados para el compostaje. La tabla 8 muestra la concentración de metales pesados del compost obtenido comparado con la norma. La densidad de coliformes no debe exceder los 1.000 NMP (número máximo permitido). (Norma 40 CFR, Parte 503 EPA 1997).

Tabla 8. Concentraciones permisibles de metales pesados.

Elemento	Norma EPA	Compost Obtenido
Cadmio	39	0,5
Plomo	300	13,2
Níquel	420	13,7
Zinc	2.800	23,5

Analizando el contenido de coliformes fecales, se establece que el compost obtenido de las pilas blanco S1, S1', S3, S3', S4 no se puede usar en ninguna actividad que este relacionada con el uso del suelo, debido a que presentan una densidad de 1.100 NMP. La pila que menor densidad de coliformes presentó fue S2' (lodo, cáscaras y urea C/N =50).

De acuerdo a los valores obtenidos para macro y micronutrientes (Costa et al., 1991) de cada pila se establece que el compost obtenido pertenece a un rango bajo para nitrógeno, fósforo, azufre, hierro y zinc; y alto para potasio, calcio, magnesio y manganeso. Basándose en la aplicabilidad del compost de acuerdo a sus características (Costa et al., 1991), el compost podría usarse para cualquier tipo de actividad agrícola, incluyendo cultivos para alimentación; a excepción de las pilas que no cumplen los valores establecidos para coniformes fecales.

CONCLUSIONES

- El lodo del tratamiento primario de las aguas residuales del proceso de fabricación de papel a partir de madera, no se debe considerar como sustrato único para el compostaje, debido a que no alcanza una zona de temperatura mayor a los 55°C, por lo que no se obtiene una buena degradación de la materia orgánica, ni la reducción eficiente de microorganismos patógenos. Aunque podría usarse para alcanzar una reducción del 20% de volumen.
- La relación carbono-nitrógeno aporta mayores perfiles de temperatura, lo que permite una actividad microbiológica mayor.
- El compostaje de lodos primarios mezclados con cáscaras, aserrín y urea; puede ser considerado como una alternativa ambientalmente factible, debido a la reducción considerable del volumen de material (74%) y microorganismos patógenos (23 NMP, de coniformes fecales).
- Se obtiene mayor reducción en la población microbiológica de tipo patógena cuando se alcanzan temperaturas superiores a los 55°C, y se mantiene por espacio de 24 horas (mínimo).

- El residuo orgánico de origen vegetal (frutas y verduras), se puede usar como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio. Además es de fácil degradación, lo que permite un incremento en los perfiles de temperaturas desarrollados.
- El compostaje de lodos primarios no presenta problemas ambientales por generación de lixiviados, debido a estos sólo se forman cuando hay un exceso en la humedad del sistema, pero esta es una variable que debe ser controlada para garantizar una eficiencia óptima del proceso.
- De acuerdo a la normatividad establecida por la E.P.A, se puede decir que el compost obtenido a partir de lodos resultantes del tratamiento primario de las aguas residuales del proceso de fabricación de papel a partir de madera; cáscaras de frutas y verduras, y urea puede ser usado en cualquier actividad de tipo agrícola, aunque deben hacerse estudios para determinar la incidencia de material al suelo.

7. BIBLIOGRAFIA

- Annual Book of ASTM STANDARDS, section 4, volume 04 -08, Soli and Rock, Building, Easton USA, 1986, Editorialstaff.
- BEYAN, H. Biobricks become a construction really water engineering management, pp 38, 39, 59. 1984.
- BOCKMAN, H. Agricultura y Fertilizantes: fertilizantes en prospective, su función para alimentar al mundo, retos ambientales, existen alternativas. HYDROAGRI, Oslo, Noruega.
- CASTRO, L. Biotecnología Agrocolombiana. Fundación Colombiana de Ciencias. 1995
- CEGARRA, J. Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. En Memorias del curso master internacional de aprovechamiento de Residuos Orgánicos. Palmira Junio 1996.
- COOKSON, J.T. Bioremediation Engineering Design and Applications, McGraw-Hill Nueva York 1995.
- COSTA, F. Residuos Sólidos Urbanos manejo y utilización. s. l. 1981
- DALZELL et al. Manejo del Suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Servicios de recursos, manejo y conservación de suelos. Dirección de fomento de Tierra y Aguas, FAO, 1991.
- EWEIS, J. B. Principios de biorecuperación. Tratamiento para contaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisico-químicos. McGraw-Hill. España, 1999.
- GROSSI, M. L. Evaluación de la calidad de los productos de las usinas de compostaje de Brasil de residuos sólidos domésticos a través de metales pesados y sustancias orgánicas. Universidad de Sao Paulo, 1993.
- Innovative uses of compost: reforestation, wetlands restoration, and habitat revitalization. EPA, 1997.
- HAUG, R. T. The practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers 1993.
- HAY, J.C. y KUCHENRITHER, R.T. "Fundamentals and Application of Windrow Composting" Journal of Enviromental Engineering, vol. 116, págs. 746-763 julio-agosto.
- KANE , B.E. y MULLINS, J.T. "Thermofilic Fungi in a municipal Waste Compost System" Mycologia 65: 1087-1100 (1973).

- KIELY, G. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Vol 3. McGraw-Hill. España, 1999.
- LOPEZ REAL, J. Reutilización de residuos urbanos en agricultura. En parámetros de control de compostaje y aplicación del compostaje a residuos orgánicos. Editorial Aedos. Madrid 1995.
- MARTIN A. Introducción a la microbiología del suelo. Editorial AGT, Mexico 1980
- MORETTI, C. La Biotecnología en el tratamiento ecológico de los residuos urbanos. Ministerio de Economía y obras Públicas. Subsecretaría de Estado de Obras y Servicios Públicos. Neuquén (Argentina) 1986.
- Ncasi, new alternative management of pulp and paper industry solid waste, technical bolletin. No 6555, 1993.
- TCHOBANOGLIOUS, G., et al Gestión Integral de los residuos Sólidos, Vol II McGraw Hill. Madrid 1993.