

# ESTUDIO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA OPERACIÓN DE PELAMBRE EN LA INDUSTRIA DEL CURTIDO DE PIELES

Nelson Fabián Cuervo Figueredo.\*

Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Ambiental: Grupo de Investigación en Residuos y Procesos Biológicos

\* ncuervof@unal.edu.co, nelsonfcuervo@yahoo.es

**Resumen.** El estudio evaluó la factibilidad técnica de reciclar el residuo producido en la operación del pelambre en la industria del curtido de pieles mediante el proceso de compostaje. De la caracterización del residuo se destaca su elevado contenido de materia orgánica y nitrógeno con valores entre 65 y 75% y entre 7 y 9% respectivamente, valores de pH entre 9 y 11, ausencia de metales pesados y altas concentraciones de calcio y sodio con valores entre 1.5 y 2.5%. Se parte del hecho de que este residuo no se biodegrada por si mismo dadas las fuertes condiciones alcalinas a las que ha sido expuesto en la operación de pelambre y que es necesario aplicar algunos inóculos para activar su proceso de transformación biológica. Se seleccionaron 3 fuentes de inóculos con antecedentes en procesos de compostaje: un caldo de cultivo, lodos de PTAR y un inóculo comercial conocido como EM® o Microorganismos Eficientes. Como estructurantes, las pilas emplearon pasto seco y viruta de madera. En definitiva se conformaron 5 pilas de análisis. Cada pila incorporó en promedio 1300 Kg del residuo pelo-lodo. Los resultados de la investigación mostraron que bajo la influencia de los inóculos, el proceso de compostaje de los residuos del pelambre se desarrolla positivamente, registrando temperaturas en el rango termófilo. Se pudo constatar que los lodos de PTAR municipal presentaron el mejor desempeño en todas las etapas del proceso, evidenciando la importancia de contar con la adecuada carga microbiana en términos de cantidad y diversidad. El compost final obtenido en la pila que brindó los mejores resultados (inóculo: lodos PTAR y estructurante: viruta de madera), se caracteriza por un elevado contenido de materia orgánica y nitrógeno, por ser un producto estable, tener un grado de madurez adecuado y un alto valor agronómico.

## 1. Introducción

Tradicionalmente la ingeniería en los procesos productivos se venía aplicando en la optimización de las variables que permitieran obtener productos de excelente calidad al menor costo. Sin embargo, el mundo de hoy presenta nuevas oportunidades que exigen al ingeniero incorporar la variable ambiental dentro de cada proceso. Con esta perspectiva, el uso racional de materias primas e insumos y de los recursos que necesita para transformarlos; así como la reducción de sus residuos a través de alternativas de minimización y reincorporación de estos a otros ciclos productivos, son opciones que merecen la atención. Precisamente el presente proyecto centra la atención en el estudio de alternativas de aprovechamiento y valorización de residuos del proceso productivo de la curtición.

Desde el punto de vista de los empresarios, el entorno de globalización viene imponiendo nuevas exigencias para el mercadeo de sus productos, no solo relacionadas con la calidad de la manufactura sino con la responsabilidad social y el desempeño medio ambiental de sus empresas. Asimismo, las diferentes partes interesadas (sociedad civil, autoridad ambiental, ONG's, las instituciones gubernamentales locales y regionales, etc) vienen asumiendo un papel cada vez más activo respecto a la problemática ambiental del sector curtidor lo cual supone importantes retos para la sostenibilidad de los empresarios del sector.

El curtido es el proceso de transformación de las pieles animales en cuero, por la reacción de las fibras del colágeno de la piel con agentes curtientes, para, de esta forma, estabilizar las fibras mediante la formación de complejos tipo quelatos, con el fin de evitar su descomposición y facilitar su uso. El producto final es empleado como materia prima para la fabricación de productos de calzado, marroquinería, talabartería, tapizados, entre otros (DAMA-acercar, 2004). Debido a la naturaleza del proceso de curtición, éste hace un uso intensivo de agua y productos químicos; lo cual, sumado a las prácticas artesanales de la mayoría de empresarios del sector, provoca serios problemas ambientales por las descargas líquidas y los residuos sólidos que se generan y se vierten o se disponen sin tratamiento alguno.

Ahondando en el proceso, la literatura reporta al pelambre como la operación de mayor aporte contaminante en las curtiembres (CPTS, 2003). El objetivo de esta operación es retirar el pelo e hinchar la piel para prepararla para el curtido, proporcionando más puntos de unión para los curtientes en general. Dependiendo del tiempo y la concentración de los reactivos, el pelo retirado a las pieles se disuelve; eliminándose en estado gelatinoso en los vertimientos, o se conserva y se retira en los residuos sólidos del proceso (MAVDT, 2006). Actualmente se están ensayando nuevas tendencias ecoeficientes orientadas a realizar un pelambre sin destrucción de pelo, reduciendo significativamente la carga contaminante en el vertimiento pero multiplicando los residuos sólidos de esta operación. Por eso deben buscarse alternativas de reciclaje de este residuo evitando que siga disponiéndose inadecuadamente; siendo éste el factor determinante para la realización del presente proyecto.

Por ser fuente de nutrientes potencialmente aprovechables para el suelo (alto contenido de materia orgánica y nitrógeno), el residuo pelo-lodo es susceptible de ser habilitado mediante el respectivo proceso de acondicionamiento denominado compostaje. El compostaje es un proceso biooxidativo controlado de un sustrato orgánico heterogéneo sólido, que evoluciona pasando a través de una etapa termofílica y de liberación temporaria de fitotoxinas como consecuencia de la actividad metabólica de diferentes comunidades de microorganismos, obteniendo como productos dióxido de carbono, agua y materia orgánica estabilizada conocida como compost (Zuconi y De Bertoldi, 1987). Su objetivo es el aprovechamiento de los residuos, reduciendo su volumen, riesgo y heterogeneidad. Aplicado a la tierra, el compost final puede funcionar como un fertilizante de liberación lenta o como un acondicionador orgánico, dependiendo de sus características, físicas, químicas y biológicas (NTC 1927:2004). Dado que el proceso de compostaje es conducido por microorganismos y que el metabolismo predominante debe ser el aerobio; la temperatura, el contenido de oxígeno y humedad y la relación C/N son con frecuencia seleccionadas como variables de control (Haug, 1993).

La complejidad del residuo derivada de los elevados valores de pH (9-11) y las altas concentraciones de sodio, calcio y azufre, consecuencia de la intensa utilización de compuestos químicos alcalinos en el proceso de depilación de las pieles, sumado a la imposibilidad de compostar el pelo por sí solo según los antecedentes encontrados al respecto que corresponden a los trabajos de la EUPMA<sup>1</sup> (Barrena et al., 2004 y 2006-1), ratifican la importancia de inocular el residuo. Metodológicamente el trabajo realizó la comparación de diferentes materiales usados como inóculos o fuentes de microorganismos aplicados al residuo pelo-lodo para su biodegradación. Para esto se evaluó la evolución del proceso y las características del compost obtenido frente a los requisitos de diferentes normas nacionales e internacionales, que regulan algunos parámetros de calidad del compost según su origen y aplicación futura.

Con base en lo anterior, el presente proyecto se trazó el objetivo de estudiar la biodegradabilidad del residuo pelo-lodo a través de su proceso de compostaje, como una alternativa de aprovechamiento y valorización de su contenido de materia orgánica. Específicamente se planteó: a) efectuar la caracterización del residuo (material compostable) procedente de la operación de pelambre en una industria de curtido que haya implementado pelambre ecológico; b) estudiar las diferencias en el proceso de compostaje con base en los parámetros fisicoquímicos y biológicos

---

<sup>1</sup> Escuela Universitaria Politécnica del Medio Ambiente -EUPMA de Barcelona (España)

monitoreados; c) comparar el desempeño de los diferentes inóculos utilizados a través del seguimiento a la evolución del proceso de compostaje del residuo y, d) establecer las condiciones finales del producto obtenido y compararlo con la norma técnica colombiana NTC 5167:2004

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Materiales compostables e inóculos

Se ha utilizado pelo parcialmente hidrolizado proveniente de las curtiembres ubicadas en la zona aledaña al río Bogotá y la carretera central del Norte dentro del área rural del municipio de Villapinzón (Cundinamarca) y que hacen parte del grupo piloto con el que se adelanta el Proyecto SWITCH en su primera fase. Este grupo de empresas desarrolla el denominado “pelambre ecológico” o pelambre sin destrucción de pelo con el objeto de minimizar la carga de orgánica en el efluente así como de reducir el consumo de cal y sulfuro.

Luego de remojar las pieles para limpiarlas y rehidratarlas se les adiciona cal con el objeto de inmunizar el pelo, permitiendo que sea posteriormente depilado por el sulfuro sin que sufra mayor destrucción. Una vez la piel ha hecho contacto con estos productos el tiempo necesario mediante la agitación mecánica en el bombo, inicia el proceso de pelambre con la adición de la primera cochada de sulfuro de sodio. El sulfuro penetra en los folículos abiertos y ataca con mayor velocidad a la queratina de las raíces del pelo, que a la queratina del pelo maduro, debido a la diferencia de velocidades de reacción de ambos. Esta diferencia permite que el pelo se quiebre en su raíz y salga relativamente íntegro (CPTS, 2003). La cal refuerza la acción del sulfuro en la extracción del pelo; solubiliza ciertas proteínas y grasas y facilita el hinchamiento de la piel. Para iniciar la filtración, debe observarse si el avance del depilado es satisfactorio, lo que normalmente sucede después de 1.5 a 2 horas de la adición del sulfuro. Esta operación evita que el pelo siga siendo atacado y eventualmente destruido por la acción del sulfuro. Seguidamente el pelo se pone a escurrir sobre lonas para luego ser dispuesto. En este caso, una vez escurrido el pelo, se empacó en bultos y se transportó al centro de compostaje de la Universidad Nacional para los respectivos ensayos de compostaje.

**Tabla 1.** Principales características del residuo pelo-lodo

Parámetro	pH	Humedad %	Materia Orgánica %	NTK %	C.O. Total %	C.O. Biodegradable %
Valor	9-10	60-70	65-75	8.5	36-42	30

Según las recomendaciones bibliográficas se utilizó pasto seco y viruta de madera como materiales estructurantes, cuya función estuvo orientada a evitar la compactación del material, incrementar la superficie de contacto del sustrato con el inóculo respectivo y aumentar la porosidad para facilitar el intercambio gaseoso. Respecto a los inóculos, se utilizaron tres fuentes de inóculos con antecedentes en procesos de compostaje: un caldo de cultivo, lodos de PTAR y un inóculo comercial conocido como EM® o Microorganismos Eficientes.

**Tabla 2.** Información microbiológica de los inóculos utilizados

Parámetro	Método	Caldo de Cultivo UFC/100 ml	Lodos PTAR UFC/100 ml	EM®
Recuento de Bacterias Heterotróficas	Filtración por membrana	3.1x10 <sup>7</sup>	1.7x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>3</sup>
Coliformes totales		2.4x10 <sup>7</sup>	3.1x10 <sup>6</sup>	---
<i>E. coli</i>		9.6x10 <sup>6</sup>	1.1x10 <sup>5</sup>	---

Del caldo de cultivo se prepararon 200 L así: 5 L de excreta de aves de corral, 20 L de estiércol bovino, 5 L de material proveniente del núcleo de una pila en etapa mesotérmica 1 y 5 L de melaza, completando con agua hasta un volumen de 200 L (Sztern y Pravia, 1999). En cuanto a

los lodos de PTAR, su aplicación como inóculo en el compostaje del residuo del pelambre encuentra soporte en los estudios realizados por la EUPMA ya reseñados en la sección anterior. Se trata de lodos activados que fueron obtenidos de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas del municipio de La Calera (Cundinamarca). La Tabla 2 reporta el análisis microbiológico de los inóculos reseñados.

## 2.2 Conformación de las pilas de compostaje

Se trabajó el método de compostaje aerobio en sistema de pilas con volteo manual. Se conformaron 5 pilas con las características presentadas en la Tabla 3. Se trata de pilas con base circular de 2.4 m de diámetro y 1 m de altura, cada una de las cuales incorporó en promedio entre 1260 y 1320 Kg de pelo.

**Tabla 3.** Conformación de las pilas de compostaje

Código de campo	Estructurante	Relación volumétrica pelo:estructurante	Inóculo	(C/N) <sup>a</sup> inicial	(C/N) <sup>b</sup> inicial
Pila 1	Pasto seco	1:1.5	Lodos PTAR municipal	4.61	3.90
Pila 2	Viruta de madera	1:1	Lodos PTAR municipal	5.15	3.79
Pila 3	Pasto seco	1:1.5	Microorganismos Eficientes	4.48	3.30
Pila 4	Pasto seco	1:1.5	Caldo de cultivo	4.45	3.33
Pila control	Pasto seco	1:1.5	N.A.--	4.70	3.50

a. Relación medida con base en el carbono orgánico total.

b. Relación medida con base en el carbono orgánico biodegradable

## 2.3 Seguimiento al proceso

Como parámetros de control a lo largo de todo el proceso se midieron la temperatura, la humedad y el contenido de materia orgánica. Igualmente, la evolución del proceso se diagnosticó a través de otros parámetros fisicoquímicos como el pH, carbono orgánico y nitrógeno total y de algunos parámetros biológicos como el índice respirométrico y el índice de germinación, los cuales permiten inferir sobre la intensidad de la actividad biológica durante el compostaje, además de ser los parámetros claves para determinar el desempeño de un inóculo. Adicionalmente para el compost final obtenido en cada pila, se realizó la determinación de metales pesados y la cuantificación de algunos tipos de microorganismos benéficos característicos del compost. Asimismo, considerando los materiales de origen (refiérase a inóculos) y los requisitos que establece la NTC 5167 para los materiales orgánicos utilizados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo, se realizó la cuantificación de microorganismos patógenos específicamente de *Salmonella sp.* y Enterobacterias totales de los cuales se establecen restricciones en la norma.

Las pruebas reseñadas se realizaron conforme a los procedimientos descritos en los Métodos Analíticos del Laboratorio Nacional de Suelos (IGAC, 2006) los cuales a su vez encuentran soporte entre otros por el U.S. Composting Council Research and U.S. Department of Agriculture, 2002. Las mediciones de temperatura se realizaron en el punto central de cada pila y en cuatro puntos distintos de ésta, los cuales se marcaron para asegurar que la medición se hiciera siempre en los mismos puntos. Esta medición se realizó con una termocupla dotada con un multímetro para leer la temperatura. En cada punto se tomaron dos medidas, una a 20 y la otra a 45 cm de la superficie de las pilas en dirección perpendicular. Las demás pruebas se realizaron en el laboratorio tan pronto como se colectaban y preparaban las muestras. El muestreo se realizó a lo largo de un corte longitudinal de las pilas del cual se seleccionaron 5 puntos equidistantes (incluido el centro y dos por cada lado de la pila). De cada uno de estos puntos se extrajo compost a dos alturas (superficie y fondo), componiendo una muestra representativa (cerca de 2 L). Las muestras se extendían y

una vez secas se molían, luego se tamizaban en un tamiz de 1 mm y finalmente se introducían en bolsas de polietileno rotuladas para su análisis. En cuanto a las pruebas biológicas, el índice respirométrico se determinó con base en un método basado en la producción de CO<sub>2</sub> y dentro de éstos, se trabajó con el que utiliza trampa alcalina para la fijación del mismo, según el procedimiento descrito en el TMECC (2001). La prueba de germinación utilizó el protocolo sugerido por Trautmann y Krazny (1997) con las adaptaciones del laboratorio (IGAC, 2006). Entretanto la caracterización microbiológica de microorganismos benéficos incluyó la preparación de los medios, siembra de las muestras, incubación y finalmente el conteo de colonias; según los métodos analíticos establecidos (IGAC, 2006). En el caso de los patógenos, la prueba para la determinación de *Salmonella sp.* siguió el mismo protocolo reseñado, mientras que las pruebas de cuantificación de bacterias coliformes totales y fecales se basaron en la técnica de tubos múltiples.

### 3. Resultados y Discusión

Con base en los resultados del recuento de bacterias heterotróficas reportado en la Tabla 2 es evidente que los lodos de PTAR ofrecen una población aproximadamente seis veces mayor que el caldo del cultivo ( $1.7 \times 10^8$  vs.  $3.1 \times 10^7$  U.F.C/100ml) incorporando un mayor número de microorganismos al sustrato compostable. Ahora si se descuenta del recuento total de bacterias heterotróficas, las bacterias coliformes totales, se obtienen las bacterias heterotróficas no pertenecientes al grupo coliforme, así:

$$\begin{array}{l} \text{Lodos PTAR:} \quad 1.7 \times 10^8 - 3.1 \times 10^6 = 1.67 \times 10^8 \text{ U.F.C/100ml} \\ \text{Caldo de cultivo:} \quad 3.1 \times 10^7 - 2.4 \times 10^7 = 7 \times 10^6 \text{ U.F.C/100ml} \end{array}$$

Este resultado indica que en los lodos de PTAR se cuenta con aproximadamente 160 millones de bacterias heterotróficas (en U.F.C/100ml) no pertenecientes al grupo coliforme más que en el caldo de cultivo. Lo anterior permite inferir que en los lodos de PTAR es más probable contar con una mayor variedad de bacterias que pueden llegar a desempeñar diferentes funciones de acuerdo a su metabolismo microbiano a lo largo del proceso de compostaje del residuo pelo-lodo. Con respecto a la presencia de *E. coli* se tiene:

$(E. coli / \text{Bacterias Coliformes Totales}) * 100 = \text{porcentaje de bacterias coliformes de origen fecal.}$

$$\begin{array}{l} \text{Lodos PTAR:} \quad (1.1 \times 10^5 / 3.1 \times 10^6) * 100 = 3.5 \% \\ \text{Caldo de cultivo:} \quad (9.6 \times 10^6 / 2.4 \times 10^7) * 100 = 40.0 \% \end{array}$$

Los resultados primero señalan que con el inóculo del caldo del caldo de cultivo se están introduciendo al sustrato compostable alrededor de 9 millones de *E. coli* (en U.F.C/100ml) más que con los lodos de PTAR. Asimismo es evidente la presencia de una mayor proporción de coliformes fecales respecto al total de bacterias coliformes en el caldo de cultivo que en los lodos de PTAR. En primera instancia esto se puede atribuir a que la bovinaza utilizada en el caldo de cultivo se encontraba fresca por lo que conservaba su humedad y su población de *E. coli* aún no había decaído. Por otro lado, el hecho de encontrar una baja población de *E. coli* en los lodos de PTAR puede ser debido a un posible decaimiento que sufre la bacteria por la diferencia de temperaturas entre la temperatura ambiente de la PTAR y la temperatura promedio del intestino de humanos y animales de sangre caliente (35 a 37°C) el cual es su hábitat (Dufour, 1977). Dufour agrega que el tiempo de residencia dentro del sistema de alcantarillado puede incidir en la muerte hasta del 99% de la población de *E. coli*. En cuanto al inóculo comercial EM®, a primera vista presenta la ventaja que no introduce microorganismos patógenos a la masa de compost. Sin embargo respecto a la demás carga microbiana heterotrófica no patógena, EM® entra en clara desventaja con los otros dos inóculos aplicados pues reporta apenas 3000 U.F.C/100ml, respecto a los 167 millones que reporta el lodo de PTAR y los 7 millones del caldo de cultivo artesanal. Ahora desde el punto de vista operativo su uso se hace más complejo pues dentro de sus instrucciones de uso se recomienda aplicar el inóculo durante la conformación de las pilas y durante los primeros 3 volteos, lo cual no resulta necesario para los lodos de PTAR y el caldo de cultivo con los que bastaría la primera aplicación si se hace un buen manejo de las variables de proceso.

En cuanto al seguimiento a la evolución del proceso, la figura 1 presenta el registro de los picos de temperatura alcanzados por las pilas a lo largo del proceso. En cuanto a la higienización del

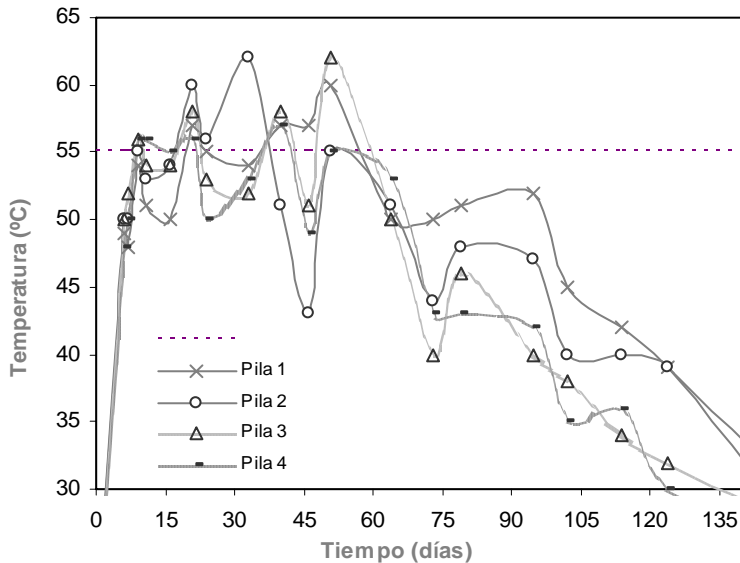


Figura 1. Perfil de temperaturas máximas alcanzadas por las pilas

compost, está establecido que se da cuando el compost mantiene temperaturas superiores a los 55°C durante un determinado intervalo de tiempo. En la figura se resalta en trazo punteado la línea recta y = 55 para diferenciar en cada pila el intervalo de tiempo en el que se logró registrar temperaturas superiores a 55°C. Según esto los perfiles temperatura-tiempo indicaron que en las pilas 1, 2 y 3 se logró la sanitización del compost, lo que no ocurrió con el compost de la pila 4, la cual alcanza escasamente los 55° en picos máximos registrados entre el día 10 y 20 de proceso.

Entretanto, la figura 2 presenta el perfil de temperaturas promedio registradas en las pilas. Dada la baja conductividad térmica del compost y los mecanismos de producción y pérdida de calor en las pilas, se considera más

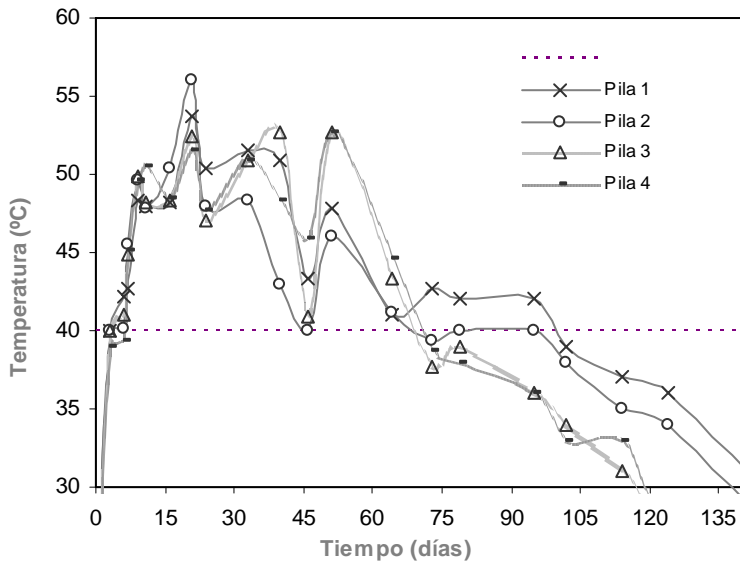


Figura 2. Perfil de temperaturas promedio registradas en las pilas

representativo hacer la descripción de las etapas del proceso de compostaje estudiado, tomando como criterio la temperatura promedio. En la figura se representa con trazo punteado la línea recta y = 40 que diferencia para cada pila el momento en que su temperatura promedio sobrepasó los 40°C, así como cuando su temperatura ya en descenso cayó por debajo de este valor; determinando con esto las diferentes etapas del proceso de compostaje que tuvieron lugar en cada pila. En general para las cuatro pilas analizadas se constataron rápidos incrementos de

temperatura, constituyéndose en la primera evidencia de activación del proceso de compostaje proyectado. Se observa como en aproximadamente 5 días las pilas superan los 40°C dejando su etapa mesotérmica para darle paso a la etapa termofílica. Mustin (1987) en Martínez (2004), sugiere etapas termofílicas más largas en la medida en que el sustrato es más difícil de degradar. Como era de esperarse, para un material de naturaleza proteica y con una estructura tan compleja como la queratina, la etapa termofílica debería ser larga, en este caso como se observa en la figura 2 se extendió a 10 semanas para las pilas 2, 3 y 4 y a 14 semanas para la pila 1. El análisis en este punto se complementa debido a la reinoculación realizada en el día 45 de proceso, dada la

pérdida súbita y continuada de temperatura provocada por condiciones adversas de humedad y muy bajas temperaturas atmosféricas. Su efecto se refleja en un rápido ascenso en los perfiles de temperatura que 5 días después logran el último pico termofílico, bien por la recuperación de humedad de las pilas o bien por la sucesiva transformación de la materia orgánica por parte de la carga microbiana introducida. Posteriormente, viene un descenso de la temperatura de las pilas manteniéndose en la etapa termofílica por el lapso mencionado. Este ascenso de temperatura permite inferir que la reinoculación fue positiva ya que aun había material para degradar, y que si no se hubiera presentado este decaimiento en las pilas, el perfil termofílico hubiera sido más uniforme; no obstante el riesgo de introducir nuevamente patógenos a la masa de compost. Luego viene la etapa de maduración del compost en la que finaliza la descomposición de sustancias fitotóxicas producidas principalmente en la etapa anterior como compuestos intermedios en el metabolismo microbiano. En la figura 2 se aprecia un patrón muy similar para las pilas 3 y 4 en esta etapa de maduración, mostrando un rápido descenso de la temperatura luego de la etapa termofílica. Entretanto para las pilas 1 y 2 el descenso es más lento, manteniendo su temperatura en esta etapa en promedio 5°C por encima de las pilas 3 y 4. Luego de 5 meses, la temperatura de las pilas descendió hasta la temperatura ambiente; concluyendo al cabo de este periodo con las pruebas de seguimiento al proceso.

A continuación se presenta el análisis de cada uno de los parámetros fisicoquímicos evaluados en el seguimiento al proceso de compostaje. Si bien se hizo un seguimiento semanal, por facilidad solo se reporta el valor de la mezcla inicial y del compost final para cada pila.

**Tabla 4.** Características iniciales de cada pila de compost y características finales del compost obtenido

Parámetro	Pila 1		Pila 2		Pila 3		Pila 4	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Humedad (%)	62.2	50.2	58.5	53.7	62.4	50.7	62.0	50.6
Materia seca (%)	37.8	49.8	41.5	46.3	37.6	49.3	38.0	49.4
Materia orgánica (%s.m.s.)	67.8	58.1	74.2	64.8	71.0	60.2	71.0	60.6
N-Kjeldahl (%s.m.s.)	8.2	5.8	8.0	5.7	8.8	6.1	8.9	6.0
Carbono Orgánico Total (%s.m.s.) <sup>a</sup>	37.7	32.3	41.2	36.0	39.4	33.4	39.4	33.7
Carbono Org. Biodegradable (%) <sup>b</sup>	31.9	19.3	30.4	20.7	29.1	20.2	29.5	19.7
C/N <sup>a</sup>	4.61	5.56	5.15	6.26	4.48	5.48	4.45	5.61
C/N <sup>b</sup>	3.90	3.34	3.79	3.60	3.30	3.31	3.33	3.28

Al apreciar los parámetros de la Tabla 4, se observan muy ligeras diferencias entre cada una de las pilas estudiadas. Es destacable la notable disminución en el carbono orgánico biodegradable, lo cual es un signo positivo de la evolución del proceso y denota la progresiva estabilización de la materia orgánica, lo cual se refleja también en la disminución de la relación C/N<sup>b</sup>. Precisamente se observa como el compost obtenido en las 4 pilas maneja un orden del 60% en materia orgánica. Igualmente los resultados muestran como cerca del 70% del nitrógeno presente en el sustrato pelo-lodo se ha mantenido durante el proceso, obteniendo un compost con un importante contenido de nitrógeno cercano al 6% para las cuatro pilas. Esto permite inferir que en última instancia la relación C/N final en el compost depende de la relación C/N inicial del material a compostar ratificando lo expresado por Barrena et al. (2006-2). Se observa también que el alto contenido de nitrógeno del residuo pelo-lodo determina relaciones C/N bajas en comparación con la óptima establecida de 20 a 30 para el trabajo de los microorganismos. Una relación mayor puede hacer más lento el proceso y en una menor no afecta la cinética del proceso pero se corre el riesgo de que el nitrógeno pueda perderse como amoníaco (NH<sub>3</sub>) (Avendaño, 2003). Sin embargo es claro que el nitrógeno se pierde mayormente por la volatilización del amoníaco cuando las temperaturas son altas y el pH es mayor a 7.5 (Díaz et al., 1996 en Sauri et al., 2002), cosa que no ocurrió en el desarrollo de las pilas ya que a las máximas temperaturas le correspondieron valores de pH entre 6 y 7. Se aprecia también que el contenido de humedad de las pilas se mantuvo en el

rango de 45 a 65% durante todo el proceso que es el rango óptimo para el buen funcionamiento del mismo (Haug, 1993).

En cuanto a la presencia de metales pesados, la caracterización realizada por espectrofotometría de absorción atómica determinó contenidos muy bajos de éstos en el sustrato (residuo pelo-lodo) comparados con los estándares nacionales e internacionales que regulan su contenido en productos orgánicos que se usaren como abonos, fertilizantes o enmiendas de suelo. De hecho se encontró que la concentración promedio de la mayoría de metales analizados está por debajo del límite de detección; lo cual era de esperarse dado el tipo de residuo y la vía de obtención de éste. Asimismo, considerando que la NTC 5167 establece la caracterización de metales pesados para aquellos productos que hayan sido mezclados con lodos de planta de tratamiento de aguas residuales, se realizó el análisis para el compost obtenido en las pilas 1 y 2. Los resultados obtenidos muestran que el compost cumple cabalmente con los requisitos de calidad exigidos en la NTC 5167 en cuanto al contenido de metales pesados y más aún con los requisitos de la U.S. EPA, que en este aspecto se advierten muchos más flexibles que la norma colombiana. Se concluye entonces que desde este punto de vista no queda restringida ninguna aplicación del compost (aplicación a tierras agrícolas, forestales, disposición en sitios de contacto público, etc).

Los resultados del pH en el compost de las 4 pilas estudiadas se muestran en la figura 3. Las curvas obtenidas guardan similitud con el perfil típico de evolución del pH expuesto por Tchobanoglous (1994) en Barrena G. (2006), solo que con la fase acidogénica (pH bajo) extendida. El valor de pH es consecuencia directa de la evolución biológica del proceso oxidativo del compostaje y ejerce un efecto evidente sobre la disponibilidad de los nutrientes, porque determina su solubilidad y porque controla la clase y tipo de actividad microbiológica y por lo tanto la mineralización de la materia orgánica (Mayo, 1997 citado por Ramírez, 2008).

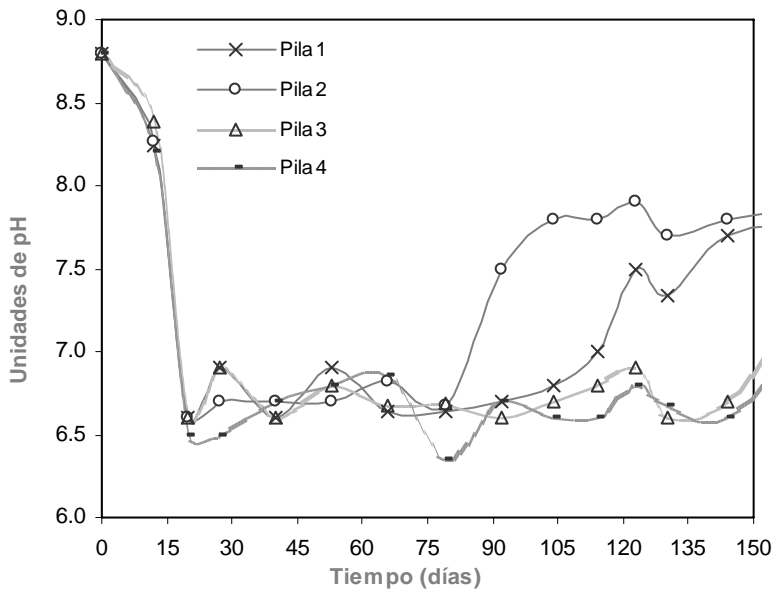


Figura 3. Evolución del pH en las pilas de compost

En todas las pilas esta fase acidogénica se extiende por varias semanas, cubriendo incluso en el caso de las pilas 3 y 4 la etapa termofílica y buena parte de la etapa de enfriamiento o maduración. A simple vista esto denota que para estas pilas la cinética del proceso fue lenta. Se puede inferir que el proceso no evolucionó con normalidad ó que no se dio la sucesión de grupos fisiológicos porque el inóculo no garantizó la diversidad microbiana necesaria en cada etapa. Por su parte los perfiles de pH en las pilas 1 y 2 reflejan una evolución normal del proceso de compostaje. Sin embargo en comparación con la pila 2, el

proceso en la pila 1 se da mucho más lento o retardado. En este caso la única diferencia entre las dos pilas es el material estructurante pues el inóculo es el mismo. El hecho de que la viruta de madera no se haya ligado o degradado junto con el residuo del pelambre a la misma velocidad con la que el pasto seco se degradó, le permitió a la pila 2 en comparación con las otras pilas mantener un mayor número de espacios vacíos en la pila para que fueran ocupados equilibradamente por aire y agua, mejorando la disponibilidad de oxígeno para los microorganismos. Asimismo, debido al estructurante, la pila 2 presentó una estructura más suelta con tamaños de partícula uniforme y sin aglomeraciones.



Finalmente, el seguimiento del proceso de compostaje desde el punto de vista biológico permitió obtener conclusiones más certeras respecto a propiedades del compost como su estabilidad y madurez, derivadas de la actividad biológica en la masa de compost. Gráficamente la figura 4 ilustra la velocidad de producción de CO<sub>2</sub> de las muestras de compost de las 4 pilas estudiadas, para las condiciones de ensayo especificadas. Los resultados en este caso se expresan en mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> ST d<sup>-1</sup>. En comparación con la pila de control en la que la actividad microbiológica es nula, es evidente que la aplicación del inóculo a las pilas de análisis logra un efecto positivo en el aumento de ésta; facilitando así que la materia orgánica contenida en el residuo de pelambre sea aprovechada y transformada por los microorganismos.

De la figura 4 es claro que el inóculo utilizado en las pilas 1 y 2 por lo menos durante la primera fase de la etapa termofílica (hasta el día 46 de proceso), logra en menor tiempo índices respirométricos mucho más bajos que los presentados para los inóculos de las pilas 3 y 4, indicando con esto una clara aceleración del proceso en dichas pilas. Estos resultados se ratifican con la alta actividad microbiana registrada en la etapa termofílica para estas dos pilas logrando así en un menor período de tiempo un producto más estable. Igualmente, éstos pueden ser atribuibles al hecho de que con el lodo de la PTAR se está introduciendo un mayor número de microorganismos heterotróficos que con el caldo de cultivo y el inóculo comercial, los cuales aceleran la degradación de la materia orgánica. Sin embargo, son visibles las diferencias entre las pilas 1 y 2 en donde a pesar de contar con el mismo inóculo, la degradación de la materia orgánica se da más lentamente en la pila 1. La curva del IR para la pila 1 presenta un comportamiento inestable, lo que igualmente se refleja en su perfil de temperatura pues presenta una etapa termofílica más prolongada que la pila 2. Estos resultados refuerzan los criterios para la selección del estructurante.

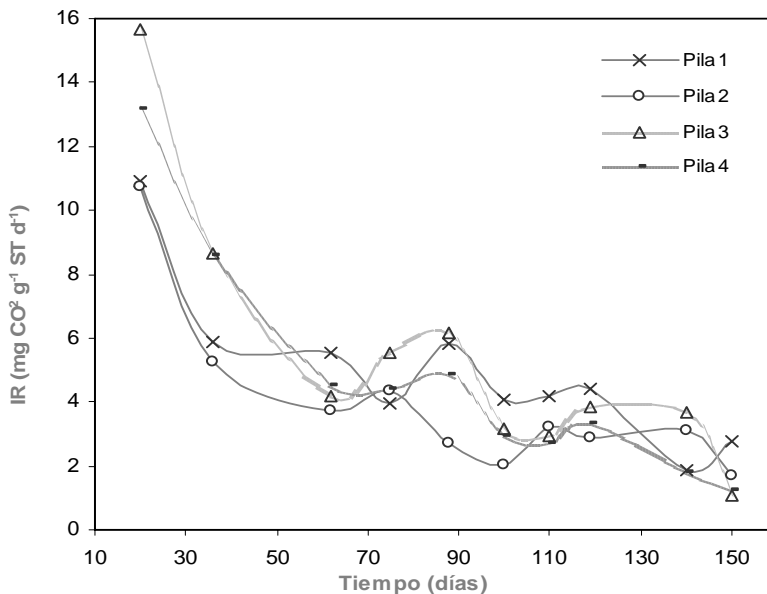


Figura 4. Índice respirométrico a 37°C (IR<sub>37</sub>) para las 4 pilas estudiadas

Justamente, fue la pila 2 la que a lo largo de todo el proceso registró los menores valores de producción de CO<sub>2</sub>, ratificando el hecho de que las tasas de respiración están directamente relacionadas con la estabilidad del compost: a mayor estabilidad menos consumo de oxígeno o producción de CO<sub>2</sub> (Barrena G., 2006). Por lo anterior se puede concluir que el tratamiento más efectivo correspondió a la pila 2. El caso contrario se presenta para la pila 3 donde la actividad de los microorganismos disminuye más lentamente indicando con esto que la materia

orgánica disponible en el material se ha degradado más despacio. Una posible explicación a esto es que la población microbiana del inóculo no era lo suficientemente diversa como para metabolizar todas las moléculas presentes en el residuo del pelambre, por lo que su degradación se hace más lenta.

De todas maneras si se compara el índice respirométrico inicial obtenido para cada una de las pilas (Pila 1: 10.9, pila 2: 10.7, pila 3: 15.7 y pila 4: 13.2 mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> ST<sup>-1</sup>) y el valor del material final (2.7, 1.7, 1.1 y 1.3 mg CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> ST<sup>-1</sup> respectivamente) se evidencia una elevada degradación biológica del pelo, en todos los casos. Sin embargo esto no implica necesariamente que se haya

dado el suficiente grado de finalización al proceso en todas las pilas. Varnero et al. (2004), argumenta que la determinación de sólo este parámetro biológico no es suficiente para acreditar la ausencia de metabolitos fitotóxicos lo que hace necesario corroborar con los bioensayos de semillas sensibles cuyos resultados se presentan a continuación.

En cuanto a la pila 1, la única respuesta positiva en la germinación de las semillas se da al diluir el compost en relación 3:1 (suelo:compost), donde parece disminuir el efecto de inhibición obteniendo un porcentaje de germinación del 50%. En cuanto al crecimiento de las raíces, los resultados reportan una inhibición del mismo orden; concluyendo en un índice de germinación (IG) del 23%. Un  $IG < 50\%$  indica un grado de fitotoxicidad severo conforme a lo expresado por Zucconi et al. (1981), Trautmann y Krazny (1997) y Graves (2000) (citado por Avendaño, 2003); correspondiente a un material inmaduro.

Similarmenete el compost de la pila 2 por si solo no ofrece las condiciones necesarias para la germinación de las semillas de repollo. No obstante, son evidentes los efectos positivos de las diluciones con suelo tanto para la mezcla 1:1 como la 3:1 (suelo:compost) con porcentajes de germinación de 71.7 y 85.6% respectivamente; en tanto que el crecimiento promedio de las raíces para los dos tratamientos está del orden de 93.8 y 128.9%. Este valor mayor al 100% quiere decir que la combinación de suelo:compost en proporción 3:1 en vez de inhibir promueve el crecimiento de las raíces de las plántulas de repollo, lo cual lejos de ser un efecto fitotóxico parece tener un carácter fertilizante pues el crecimiento del tallo es similarmente promovido por encima del obtenido para el control. Finalmente, con estos resultados se obtuvo un índice de germinación del 67% para la dilución 1:1 y del 106% para la dilución 3:1. Dado lo anterior, es evidente que la acción diluyente del suelo disminuye la concentración de sustancias fitotóxicas, mostrando como el efecto de inhibición se reduce conforme aumenta la dilución (suelo:compost). Respecto a los IG obtenidos, los autores reseñados establecen que valores de  $IG \geq 80\%$  indicarían que no hay sustancias fitotóxicas o están en muy baja concentración. En cuanto a las pilas 3 y 4 ninguno de los tratamientos mostró respuesta, indicando con esto el alto contenido de sustancias fitotóxicas presentes en el material. Estos resultados van de la mano con la ralentización del proceso en estas pilas ya expresada en otras variables como el pH y la tasa de respiración, que indicaron que la materia orgánica disponible en el material se degradó más lentamente.

Varnero (2007) argumenta que los efectos fitotóxicos de un material orgánico inmaduro se deben a diversos factores, entre los cuales destacan los contenidos de amonio, de ácidos volátiles orgánicos, de metales pesados y de sales. No obstante, la presencia de metales pesados en el compost obtenido ya se descartó, por lo que en este caso se presume que la fitotoxicidad es debida principalmente a la presencia de ácidos orgánicos y el elevado contenido iónico de elementos como sodio, calcio y azufre. No obstante, al comparar el contenido iónico en el compost, por ejemplo en cuanto al sodio, se puede inferir que es alto pero muy semejante en las 4 pilas, dado que el sustrato compostable es el mismo. Se esperaría entonces el mismo aporte de fitotoxicidad debida a este factor en las 4 pilas. Con base en lo anterior, cobra importancia en el grado de fitotoxicidad de cada compost, la evolución del proceso entendida como el grado de oxidación de la diferentes moléculas orgánicas y por ende el grado de descomposición de las fitotoxinas que se producen a lo largo de este proceso. Esto último parece tener un peso más significativo en el predominio del efecto fertilizante o fitotóxico que presenta cada uno de los tratamientos en cada una de las pilas.

Finalmente, aunque aún no esta generalizado el uso de estándares de calidad de compost respecto al contenido de diferentes grupos de microorganismos benéficos, se asume que un buen compost debe proveerlos. En cuanto a la regulación nacional, la NTC 5167 expresamente señala que si el producto (compost) presenta contenido de microorganismos benéficos debe declararse el recuento de éstos. Al respecto la Tabla 5 presenta el resultado obtenido para las 4 pilas de compost con base en la metodología reseñada en la sección anterior.

Si bien la bibliografía es limitada en cuanto a estándares microbiológicos en el compost, se ha tomado como punto de referencia la información del website de la empresa Bioagro<sup>2</sup> que señala a su vez como fuente al U.S. Department of Agriculture, encontrando que el contenido de los diferentes grupos de microorganismos benéficos evaluados es aceptable.

**Tabla 5.** Cuantificación de microorganismos característicos del compost en UFC/g compost\*

ID Muestra	HONGOS	BACTERIAS HETERÓTROFAS	BACTERIAS TIPO ACTINOMICETO	FIJADORES DE NITRÓGENO	SOLUBILIZADORES DE FOSFATOS	CELULOLÍTICOS
Pila 1	<b>35 x 10<sup>4</sup></b>	<b>11.1 x 10<sup>6</sup></b>	<40 x 10 <sup>4</sup>	41.7 x 10 <sup>4</sup>	40 x 10 <sup>4</sup>	<b>27 x 10<sup>5</sup></b>
Pila 2	20 x 10 <sup>3</sup>	93 x 10 <sup>5</sup>	<b>&lt;70 x 10<sup>4</sup></b>	<b>29.6 x 10<sup>5</sup></b>	29.5 x 10 <sup>4</sup>	13.5 x 10 <sup>5</sup>
Pila 3	70 x 10 <sup>3</sup>	23 x 10 <sup>5</sup>	<10 x 10 <sup>3</sup>	20.9 x 10 <sup>5</sup>	<b>27.3 x 10<sup>5</sup></b>	14 x 10 <sup>5</sup>
Pila 4	16 x 10 <sup>4</sup>	40 x 10 <sup>4</sup>	<12 x 10 <sup>4</sup>	10.8 x 10 <sup>5</sup>	17.5 x 10 <sup>5</sup>	23.5 x 10 <sup>5</sup>

\* Reportado en base seca.

Respecto al contenido de microorganismos patógenos, en la tabla 6 se presentan los resultados de la evaluación de coliformes totales, fecales y *Salmonella sp.* para cada una de las pilas de análisis, obtenidos según las técnicas descritas en la sección anterior.

**Tabla 6.** Contenido de microorganismos patógenos en el compost\*

Parámetro	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	NTC 5167	40 CFR Part 503 <sup>3</sup>
					Valores límite	
<b>Coliformes Totales (NMP/g)</b>	46 x 10 <sup>3</sup>	93 x 10 <sup>2</sup>	43 x 10 <sup>2</sup>	93 x 10 <sup>2</sup>	---	---
<b>Coliformes Fecales (NMP/g)</b>	610	910	300	2100	< 1000 UFC/g	< 1000 NMP/g
<b><i>Salmonella sp.</i> (UFC/g)</b>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	ausente en 25 g	< 3 NMP/4 g

\*Reportado en base seca.

Como se explicó anteriormente, desde el punto de vista de los perfiles tiempo/temperatura se puede inferir que en las pilas 1, 2 y 3 se logró la higienización del compost, lo que no ocurrió con el compost de la pila 4. Desafortunadamente con la reinoculación se introdujo una nueva carga de patógenos que no alcanza a ser inactivada en su totalidad a pesar del último pico termofílico logrado tras ésta. No obstante, la concentración de coliformes fecales en el producto final no resultó tan elevada (véase Tabla 6). De cualquier forma, los resultados son satisfactorios en tanto que no se detectó presencia de *Salmonella sp.* para ninguna de las pilas y la reducción de coliformes fecales fue significativa. Ahora si se juzgase el compost obtenido con los criterios de la U.S. EPA, el resultado sería aceptable pues se cumple con los requisitos Clase A respecto a la reducción de patógenos. Con respecto a la norma técnica colombiana, el compost obtenido en las 3 primeras pilas cumple los requisitos microbiológicos.

En síntesis se puede inferir que el compostaje puede proveer una completa destrucción de bacterias patógenas y reducir los indicadores de contaminación fecal a niveles muy bajos. Haug (1993) y NRCS (2007) afirman que existe una alta probabilidad de destrucción de patógenos si se logra que todo el material se exponga a condiciones letales (requisitos tiempo/temperatura).

<sup>2</sup> Bioagro: empresa uruguaya dedicada a la fabricación de compost. Disponible en Internet en: <http://www.bioagro.com.uy/analismicrobiologico.htm>

<sup>3</sup> 40 Code of Federal Regulations, Part 503, Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge" de la U.S. EPA.

#### 4. Conclusiones

- El proyecto permite concluir que bajo la influencia de simientes o inóculos, el proceso de compostaje de los residuos del pelambre se desarrolla positivamente, registrando temperaturas en el rango termófilo, en contraste con lo reportado para la pila de control en la que la temperatura no evolucionó. - Asimismo en cuanto al residuo se pudo constatar cómo su contenido de materia orgánica y de nitrógeno se alteran significativamente dependiendo del grado de control y de la técnica que se utilice en la operación del pelambre. Esto debido a que si el pelo no se recupera o se filtra a tiempo, este continúa hidrolizándose y su contenido de nutrientes se pierde con los efluentes líquidos. - En cuanto a los inóculos se pudo concluir que por la naturaleza del residuo a compostar, cualquier inóculo debe garantizar una población fisiológicamente diversa que pueda actuar conjuntamente o bien sucederse en el tiempo, tanto en la transformación del material fácilmente biodegradable como de compuestos orgánicos más complejos. De los tres inóculos utilizados se constató que los lodos de PTAR doméstica mostraron el mejor desempeño en todas las etapas del proceso de compostaje del residuo pelo-lodo. – Junto con la temperatura y el pH, los parámetros biológicos han resultado claves para estudiar los efectos de la aplicación de los inóculos en el proceso de compostaje del residuo pelo-lodo. El índice respirométrico IR<sub>37</sub> y el test de germinación permitieron hacer claras diferenciaciones respecto al desempeño de los inóculos en la aceleración y grado de finalización del proceso de compostaje del residuo pelo-lodo.
- Respecto a la presencia de metales pesados, es viable la producción de compost a partir del residuo pelo-lodo dada su baja concentración en el residuo, asimismo es procedente utilizar lodos de PTAR doméstica como inóculo, dado que en las pilas que lo utilizaron tampoco se reportó un contenido objetable según los criterios establecidos por la NTC 5167 y el 40 CFR-Part 503.
- Respecto a la higienización del compost se pudo concluir que el contenido de patógenos así como de indicadores de contaminación fecal no representan un obstáculo en la inoculación de las pilas de compost, pues se evidenció que el compostaje puede proveer una completa destrucción de bacterias patógenas y reducir los indicadores de contaminación fecal a niveles muy bajos.

En términos generales la investigación permitió concluir que: - El compost final obtenido en la pila que brindó los mejores resultados (Pila 2: inóculo: lodos PTAR y estructurante: viruta de madera), se caracteriza por un elevado contenido de materia orgánica y nitrógeno, por ser un producto estable, tener un grado de madurez adecuado y un alto valor agronómico. - El compostaje se muestra como una tecnología viable desde el punto de vista técnico y ambiental para el aprovechamiento de los residuos de la operación de pelambre producidos en grandes cantidades en la industria del curtido de pieles.

#### Agradecimientos

Al Proyecto de Investigación auspiciado por el Institute for Water Education UNESCO-IHE de Holanda denominado Proyecto SWITCH “El Manejo Sostenible del Agua en las Ciudades del Mañana” el cual financió el 20% del desarrollo del proyecto. Al Sistema de Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia y el personal del Centro de Compostaje. Al Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y específicamente a su director y al Área de Análisis Biológicos. Al profesor Antoni Sánchez Ferrer de la Universidad Autónoma de Barcelona (España) por su asesoría y a Miguel Vila de Igualada (España) por su colaboración documental. A mis profesores de la Maestría en Ingeniería Ambiental y específicamente a la Dra. Maria Consuelo Díaz, el Dr. Ingeniero Otoniel Sanabria Artunduaga y el Ing. MSc. Carlos Julio Collazos por su asesoría y colaboración el desarrollo de la presente investigación.

#### Referencias

- 40 Code of Federal Regulations, Part 503, Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge.
- AVENDAÑO, D. El proceso de compostaje. Tesis de Postgrado. Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, 2003.

- BARRENA, R., MIRÓ, E. y SÁNCHEZ, A. Estudio del compostaje de residuos de pelo generados en el proceso de fabricación de la piel. Capacitación en Aprovechamiento y Valorización de Residuos del Sector de Curtiembres. Corporación Ambiental Empresarial – CAE/CCB-EUROCENRO, 2004.
- BARRENA, R., VÁSQUEZ, F. y SÁNCHEZ, A. The use of respiration indices in the composting process: a review. Waste Management & Research, 2005.
- BARRENA G., Raquel. Compostaje de Residuos Sólidos Orgánicos. Aplicación de Técnicas Respirométricas en el seguimiento del proceso. Memoria de Tesis. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Barcelona. España, 2006.
- BARRENA, R., VÁSQUEZ, F. y SÁNCHEZ, A. Co-composting of hair waste from the tanning industry with de-inking and municipal wastewater sludges. Springer Science+Business Media B.V, 2006. (1)
- BARRENA, R., PAGANS, E., FALTYS, GARY. Y SÁNCHEZ, A. Effect of inoculation dosing on the composting of source-selected organic fraction of municipal solid wastes. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 81:420–425, 2006. (2)
- BIOAGRO: empresa uruguaya dedicada a la fabricación de compost. Disponible en Internet en: <http://www.bioagro.com.uy/analismicrobiologico.htm>
- BUTLER, T., SIKORA, L. y OTROS. Compost Age and Sample Storage Effects on Maturity Indicators of Biosolids Compost. Journal of Environment. Quality, 30:2141–2148 (2001).
- Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles –CPTS en convenio con el Programa de Cooperación Danesa al Sector de Medio Ambiente. Guía Técnica de Producción Más Limpia para Curtiembres. Bolivia, 2003.
- CEPIS, Informe Técnico Sobre Minimización de Residuos en una Curtiembre. 1996. Disponible en internet: <http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/gtz/infomini/minimiza.html>.
- CUERONET. La comunidad del cuero. Disponible en Internet en: <http://www.cueronet.com>
- DAMA, CINSET. Planes de Acción para el Mejoramiento Ambiental. Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para PYMES -ACERCAR. Bogotá, 2002.
- DAMA, CCB. Guía Ambiental para el Sector Curtiembres. Unidad de Asistencia Técnica Ambiental para PYMES -ACERCAR. Bogotá, 2004.
- Environmental Protection Agency (EPA). Biosolids Technology Fact Sheet -Use of Composting for Biosolids Management. Disponible en Internet en: <http://www.epa.gov/owm/mtb/mtbfact.htm>
- HAUG, Roger. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, 1993.
- ICONTEC. NTC 1927. Norma Técnica Colombiana. Definiciones sobre materiales orgánicos utilizados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.
- ICONTEC. NTC 5167. Proyecto de Norma Técnica Colombiana. Productos para la industria agrícola, materiales orgánicos utilizados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos. 2006.
- LORBER, K., KONRAD, O., y OTROS. Compostaje de residuos sólidos de curtiembre. Institute for Waste Management & Landfill Technologies, University of Leoben, Austria. Ponencia en: XV CONGRESO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL AIDIS. Concepción, Chile; octubre de 2003.
- MARTÍNEZ, Gonzalo. Evolución temporal del alperujo procedente de Almazara. Tesis de Postgrado. Universidad de Córdoba. España, 2004.
- MILLER, F. C. Biodegradation of solid wastes by composting. Biological degradation of wastes. p 1-5. Elsevier Science Publishers. England, 1991.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT. Guía Ambiental para la Industria del Curtido y Preparado de Cueros. Colombia, 2006.
- National Center for Biotechnology Information –NCBI. Disponible en Internet en: (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>).
- National Resources Conservation Services -NRSC of U.S. Department of Agriculture. Managing for Better Compost. 2007.
- RAMÍREZ, N. y RODRÍGUEZ, S. Adecuación del sistema de tratamiento de residuos sólidos orgánicos generados en la planta de producción de alimentos de Levapan S.A. por compostaje. Corporación Tecnológica de Bogotá en convenio con la Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas –UDCA. Bogotá, 2008.
- ROBEN, Eva. Manual de Compostaje para Municipios. Loja, Ecuador; 2002.
- SANCHEZ, M., URPILAINEN, S., y OTROS. Assessing the stability and maturity of compost at large-scale Plants. Ponencia en: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México, 2002.
- SAURI, M., NAJERA, H., y OTROS. Aplicación del compostaje como método de tratamiento de los residuos de frutas producidos en zonas de alta generación. En: Ingeniería Revista Académica. Enero/abril v.6 n.001. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida (México), 2002.
- SZTERN, D. y PRAVIA M. Manual para la Elaboración de Compost –Bases Conceptuales y Procedimientos. Publicado por ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. OPS-OMS. Uruguay, 1999.
- Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC). Por U.S. Composting Council Research and U.S. Department of Agriculture, 2001.
- TRAUTMANN, N. y KRASNY., M. Composting in the classroom. Cornell University. Cornell, 1997.
- VARNERO, M., FAUNDEZ, T. y OTROS. Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustrato. Simposio de las Ciencias del Suelo “Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales. Chile, 2004
- VARNERO, M., ROJAS, A. y ORELLANA, R. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. Journal of Soil Science Nutrition. 7 (1) (28-37), 2007.
- The Waste and Resources Action Programme (WRAP). Review of Compost Standards in the UK: Supplement to Main Report: Comparison of Compost Standards Within the EU, North America and Australasia. 2002.
- ZUCCONI, F., PERA, A. y OTROS. Evaluating toxicity in immature compost. En: Biocycle 22: 54–57, 1981.