

Aprovechamiento de Biosólidos

Generados en la Planta de Tratamiento San Fernando, Medellín Mediante Procesos Bioxidativos en Producción de Abonos de Liberación Lenta y Enmiendas Orgánicas

Rodrigo Ramírez Palacios*
Carlos Peláez**

Síntesis

Con el fin de buscar, desde la sostenibilidad, una alternativa a la disposición de los biosólidos producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando, se procedió a la evaluación experimental de la eficiencia del proceso de bioxidación de estos residuos, en combinación con materiales de soporte (celulosa residual y restos de poda), para la elaboración de abono orgánico. Los análisis fisicoquímicos, microbiológicos, de fitotóxicos y enzimáticos permitieron establecer la viabilidad del abono obtenido para diversos usos agrícolas (tipo A) de acuerdo con la norma técnica colombiana y los criterios sanitarios de la EPA. La mezcla de biosólidos y celulosa residual en proporción 50/50, con relación Carbono/Nitrógeno inicial de 20, presentó los mejores resultados en términos de estabilización de la materia orgánica, reducción de microorganismos patógenos y metales pesados. Respecto a éstos, sólo el cromo presentó en algunos análisis resultados superiores a los 1200 ppm permitidos. Con estos materiales, se formularon 15 bioabonos cuya composición garantiza cantidades óptimas de macro y micronutrientes para el crecimiento de las plantas. Para que esta alternativa sea posible, se requiere que EPM controle los niveles de cromo⁺⁶ a la entrada, garantizando la calidad del efluente.

Palabras claves

Biosólidos, enmiendas orgánicas, abono orgánico, actividad microbiana, enzimas, fitotóxicos, enterobacterias, estabilización bioxidación, sanitización.

Utilization of Bio-solids generated in the treatment plant San Fernando Medellín. Production by Bioxidative Processes Slow Release Fertilizers and Organic Amendments

Abstract

To seek, from sustainability, and alternative to the disposal of biosolids produced at the Wastewater Treatment Plant San Fernando, we proceeded to the experimental evaluation of the efficiency of bioxidation residues, in combination with support materials (cellulose waste and pruning) for the production of organic fertilizer. Physico-chemical, microbiological, phytotoxics and enzymatic analysis allowed establishing the viability of fertilizer obtained for various agricultural uses (type A) according to the Colombian technical standard and EPA health criteria. The mixture of biosolids and residual cellulose, 50/50, with carbon / nitrogen initial ratio of 20, presented the best results in stabilization of organic matter, reduction of pathogens and heavy metals. Regarding

these, only the chromium introduced in some laboratory results over 1200 ppm permitted.

Key words

Biosolids, organic amendments, organic fertilizer, microbial activity, enzymes, phytotoxic, enterobacterias, stabilization, bioxidation, sanitation.

* Rodrigo Ramírez Palacios
Graduado como licenciado en química y biología de universidad tecnológica del chocó en el año 1986. Posteriormente hace estudios de especialización y maestría en ingeniería ambiental en la universidad pontificia bolivariana, en convenio con el grupo GIEM de la Universidad de Antioquia.

** Carlos Peláez Jaramillo
Biólogo de la Universidad de Antioquia. Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM) de Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia

1. Introducción

La implementación de controles por parte de las autoridades ambientales y sanitarias ha incrementado la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en Colombia y, con ello, el volumen de los lodos y biosólidos que son los productos finales de estos sistemas. Estos residuos, a pesar de los procesos previos de estabilización como digestión anaerobia y deshidratación, contienen materia orgánica fermentable, químicos orgánicos, metales pesados y microorganismos patógenos que superan las $1 \cdot 10^3$ Ufc/g recomendadas por las legislaciones nacionales e internacionales. Esta situación preocupa a las autoridades ambientales, pues los biosólidos representan grandes riesgos ambientales y sanitarios para la comunidad y para los seres vivos en general, debido a que su inadecuada disposición puede contaminar las reservas superficiales y subterráneas de aguas; introduciéndose a la cadena trófica, pueden generar problemas de cáncer por el exceso de nitratos que, por acción bacteriana, son transformados en nitritos, convirtiéndose en los responsables del cáncer de estómago y de hígado en humanos¹. Dada la gran carga contaminante (biológica y química) presente en los biosólidos, se han clasificado como clase B, con restricciones para uso agrícola, y se han definido como RSE² (Residuos Sólidos Especiales) por el Ministerio de Salud.

La planta de tratamiento secundario de San Fernando trata actualmente $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua residual y genera un total de 100 ton/día de biosólidos base húmeda³. En el Valle de Aburrá, se genera un total de 160 ton/día entre lodos y biosólidos, de los cuales el 98% son producidos por la PTAR San Fernando y la industria papelera (FAMILIA y KIMBERLY), lo que las convierte en las dos principales productoras de lodos de la región metropolitana⁴. Además se está generando

un total de $400 \text{ m}^3/\text{mes}$ de restos de poda que también incrementan la producción de residuos.

Actualmente no existe una alternativa sostenible para la disposición final de estos residuos, pues por decisión de CORANTIOQUIA, no pueden ser llevados al relleno sanitario de La Pradera. Actualmente se vienen disponiendo en un 90% como enmiendas de suelos en los municipios de Entreríos, Don Matías, Amagá, San Pedro, Támesis y Santa Rosa pero la vida útil para disposición en estos terrenos está estimada en sólo 2 años⁵. A esta dinámica se suma que a partir del 2010 se iniciará la construcción de la planta de tratamiento del municipio de Bello, que producirá unas 300 ton/día de biosólidos.

Dado que el problema de disposición de los biosólidos en Colombia es relativamente nuevo, son pocas las opciones que permiten la valorización de estos residuos, como sí ocurre en otros países desarrollados (UE y EUA). Consientes de que los biosólidos de la PTAR San Fernando contienen nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio, que son esenciales para el desarrollo de las plantas, se hace necesario desarrollar investigaciones que permitan reconocer la realidad sanitaria y ambiental de estos materiales y mostrar alternativas para el uso y disposición final de los mismos, al igual que su comercialización e incorporación al ciclo productivo. Con ello, se podrían recuperar en parte los altos costos de los procesos previos de estabilización que representan cerca del 50% del costo total del tratamiento de las aguas residuales⁶ y garantizar la viabilidad y sostenibilidad de la planta actual y de las próximas a construir dentro del plan de saneamiento del río Medellín.

Aunque existen diferentes técnicas para mejorar la calidad de los biosólidos, como el tratamiento térmico y la estabilización alcalina, los proce-



Los procesos biooxidativos⁷ se convierten en la mejor alternativa para solucionar la problemática de estos biosólidos. Estos procesos permiten estabilizar el producto con unos costos de inversión relativamente bajos, mediante la adición de materiales de soporte de fácil consecución en la región, como celulosa residual y restos de poda en cantidades adecuadas. Estos procedimientos permiten activar las enzimas presentes en el biosólido⁸ y reducir los microorganismos patógenos hasta obtener un producto totalmente sa-

nitizado (es decir, exento de riesgos sanitarios y ambientales) que puede ser usado como enmienda de suelos y como materia prima para la fabricación de fertilizantes mineral-orgánicos⁹. Esta alternativa se convierte en un proyecto novedoso, pues permite el retorno al suelo de nutrientes que, por su contenido de materia orgánica, pueden ser liberados en forma lenta, y usados de manera más eficiente por las plantas, logrando así el re-uso de residuos orgánicos.

2. Materiales y métodos

El trabajo experimental se desarrolló en el laboratorio del Grupo interdisciplinario de estudios moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia. Se utilizaron muestras del biosólido provenientes de la PTAR San Fernando que habían pasado por un proceso de digestión anaerobia y materiales de soporte (celulosa residual y restos de poda), los cuales fueron caracterizados físicoquímica y microbiológicamente al inicio y al final del proceso para verificar su potencial de uso agrícola. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Variables analizadas en cada reactor

Variables químicas			Variables biológicas		
Parámetro	Método	Norma	Parámetro	Unidad	Norma
Nitrógeno total	Kjeldahl	NTC370	Mesófilos	u.f.c/g*	NTC 5167
Fósforo, P ₂ O ₅	Fotométrico	NTC234	Termófilos	u.f.c/g	NTC 5167
Potasio, K ₂ O	E.C	No aplica	Mohos	u.f.c/g	NTC 5167
Calcio, CaO	E.C	No aplica	Nemátodos	u.f.c/g	NTC 5167
Magnesio, MgO	E.C	No aplica	Levaduras	u.f.c/g	NTC 5167
Zinc, Zn	E.C	No aplica	Protozoos	u.f.c/g	NTC 5167
Cromo, Cr	A.A	SM3111B	Enterobacterias	u.f.c/g	NTC 5167
Cadmio, Cd	A.A	SM3111B	Salmonella sp	u.f.c/g	NTC 5167
Plomo, Pb	A.A	SM3111B	UFC: Unidades formadoras de colonias		
Níquel, Ni	A.A	SM3111B	NTC: Norma Técnica Colombiana		
Arsénico, As	P.D.P	SM3500As			
CIC	Volumétrico	SSLMM	Variables físicas		
Humedad	Gravimétrico	NTC5167	CRA	Gravimétrico	NTC 5167
pH	Potenciométrico	SSLMM	Humedad	Gravimétrico	NTC5167
Temperatura	Termómetro bulbo	NTC5167	Densidad	Gravimétrico	NTC5167
Conductividad	Potenciométrico	SSLMM	CRA: Capacidad de retención de agua		

CN: carbono nitrógeno. CIC: capacidad de intercambio catiónico. CO: carbono orgánico. EC: Electroforesis capilar. P.D.P: Polarografía diferencial de pulso. NTC: Norma Técnica Colombiana. ND: No detectado. SM: Standard Methods. SSLMM: Soil Survey Laboratory Methods Manual. Reporte N°42, Versión 3.0,1996

Fuente: Norma Técnica Colombiana (NTC5167/04), Soil Survey Laboratory Method (SSLMM).

2.1 Trabajo experimental

Montaje y seguimiento de los reactores

Se emplearon tres reactores alimentados con biosólidos de la PTAR San Fernando. El primero se montó con biosólidos y celulosa residual, en proporción 50%-50% V/V y relación C/N¹⁰ inicial de 20; el segundo, con biosólidos y restos de poda en igual proporción y con relación C/N inicial de 16.25; y el tercero contenía biosólidos en un 100%, con relación C/N de 6.7. Los tres reactores fueron operados durante 42 días, controlando condiciones de humedad y temperatura; se realizaron volteos 2 veces por semana y se tomaron muestras cada 8 días para ser analizadas en el laboratorio. Se efectuaron las caracterizaciones fisicoquímicas, microbiológicas, enzimáticas y fitotóxicas tanto a los biosólidos como a los materiales de soporte (celulosa residual y restos de poda), previo al proceso de bioxidación, con el fin de conocer el aporte a la mezcla de cada una de las materias primas en cuanto a humedad, metales pesados, microorganismos y nutrientes que permitan alcanzar una relación C/N óptima (20-30)¹¹, y garantizar el sustrato suficiente para un buen proceso de bioxidación, de acuerdo con las variables mostradas en la Tabla 1.

Para el diseño del sistema de bioxidación se efectúa un balance de materiales con el fin de determinar la cantidad de cada componente en los reactores¹², para ello se evalúan los siguientes parámetros¹³: volumen total; peso húmedo total; contenido total de sólidos (peso seco); contenido de agua (peso húmedo); densidad de la masa (peso húmedo); porcentaje de nitrógeno y porcentaje de carbono. El montaje de los reactores se realiza mezclando los biosólidos a compostar y los materiales de soporte, teniendo en cuenta el mantenimiento de cierta cantidad de humedad, que puede oscilar entre el 50 y el 60%^{15,16} y una relación de carbono-nitrógeno adecuada, (entre 20 y 30). Para el cálculo de la relación carbono-nitrógeno, la humedad teórica y los volúmenes a mezclar, se utilizaron las ecuaciones (Ec.1, Ec.2 y Ec.3) recomendadas por McFarland, en Biosolids engineering¹⁷ y Maison Marañón en Problemas de ingeniería ambiental¹⁸.

(Ec.1):

$$\text{Relación CarbonoNitrógeno: } C/N = \frac{C. \text{ en } 1\text{Kg de } A + X(C. \text{ en } 1\text{Kg de } B)}{N. \text{ en } 1\text{Kg de } A + X(N. \text{ en } 1\text{Kg de } B)}$$

(Ec.2):

$$* \text{Contenido de humedad} = \frac{(\text{Agua en } 1\text{kg de } A) * \text{peso de } A + (\text{agua en } 1\text{kg de } B) * \text{peso de } B}{\text{peso de } A + \text{peso de } B}$$

(Ec.3): *Volumen a mezclar = $W: \text{material seco} / \%H * D;$

X: kg necesarios del material a mezclar; C: Carbono; N: Nitrógeno; A, B: Materiales de soporte utilizados; W: gr de material; H: humedad; D: densidad

Teniendo en cuenta las densidades de cada uno de los componentes a mezclar y su contenido de humedad, se procedió a las mezclas volumen a volumen, para garantizar los nutrientes necesarios y el contenido deseado de humedad e incrementar la porosidad del biosólido; se efectuaron las mezclas 50/50 volumen a volumen, es decir 1:1 en ambos reactores, a pesar de que, para el reactor 2, el óptimo sería 60/40 de poda y biosólidos, respectivamente. Con base en que los biosólidos con un contenido de sólidos del 15 al 25% requieren de 2:1 a 3:1 en volumen básico para obtener una humedad deseada, mientras que para biosólidos con contenido de sólidos mayores al 25%, como es el caso de nuestros biosólidos (con 38%), se pueden utilizar mezclas 1:1¹⁹.



2.2 Formulación de los bioabonos

Una vez estabilizados y maduros los compost y conociendo los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos, se procedió a formular las mezclas mineral-orgánicas para la obtención de los bioabonos simples y compuestos.

Para encontrar la cantidad de cada componente de la mezcla mineral orgánica, se tuvo en cuenta la relación de %N, %P y %K del compost que se utiliza, al igual que la concentración de cada nutriente en la fuente mineral, así: urea ($H_2N-C-NH_2O$) que contiene un 45% de nitrógeno; superfosfato triple $Ca(H_2PO_4)_2 + (CaSO_4 \cdot 2H_2O)$, con un 45% de fósforo, expresado como P_2O_5 y el cloruro de potasio (KCl), con un 60% de potasio, como K_2O . La relación de %N, %P y %K depende del tipo de cultivo en el que se va a realizar la aplicación. Teniendo en cuenta lo anterior, se han obtenido 15 formulaciones que cumplen con los criterios sanitarios de la NTC 5167/04 y con las cantidades óptimas de Nitrógeno, Fósforo y Potasio para abonos agrícolas. Para el cálculo de los contenidos de NPKC en cada uno de los abonos, se utilizan las ecuaciones 4, 5, 6 y 7.



$$(Ec.4): \%N = \frac{W_{urea} * \%N_{urea} + W_{compost} * \%N_{compost}}{W_{totales}}$$

$$(Ec.5): \%C = \frac{W_{material} * \%C_{material} + W_{compost} * \%C_{compost}}{W_{totales}}$$

$$(Ec.6): \%P = \frac{W_{superfosfato} * \%P_{fosfato} + W_{compost} * \%P_{compost}}{W_{totales}}$$

$$(Ec.7): \%K = \frac{W_{cloruro} * \%K_{cloruro} + W_{compost} * \%K_{compost}}{W_{totales}}$$

3. Análisis de productos finales

La normatividad nacional e internacional vigente establece que los productos finales deben cumplir con unos parámetros fisicoquímicos y biológicos. La Tabla 2 da cuenta de los valores de las variables fisicoquímicas y microbiológicas para los productos finales obtenidos de la mezcla de biosólidos con materiales de soporte (celulosa residual y restos de poda).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y enzimáticas de los productos finales en el proceso de biooxidación

Parámetro	Reactor 1 (Biosólidos-Celulosa R.C/N 70)	Reactor 2 (Biosólidos-Poda. R.C/N16.25)	Reactor 3 (Biosólidos 100% R.C/N 6.7)
pH	6.96	6.91	6.81
CE (μ/cm)	661.00	1506.70	995.50
Temperatura($^{\circ}C$)	39	25	25
CO (%)	15.45	16.94	16.57
Cenizas (%)	60.73	52.14	65.18
CIC (meq/100g)	30.46	33.51	48.61
CRA (%)	126.45	157.85	104,28
N. total (%)	1.65	1.50	1.94
Fósforo P_2O_5 (%)	1.73	2.69	2.43
Potaslo K_2O	ND	0.51	0.27
R.C/N.	11,80	13.30	9.6
I.G (%)	80	82	80

Respirometría (mg.CO ₂ /h)	Rango: 0 – 1.76	Rango: 1.3 – 8.09	NA
Enterobacterias (Ufc/g)	9.5*10 ²	2.2*10 ²	9.0*10 ²
Mesófilos (Ufc/g)	2.5*10 ⁶	6.4*10 ⁸	5.0*10 ⁷
Termófilos (Ufc/g)	2.4*10 ¹⁰	7,5*10 ⁸	2.7*10 ⁶
Mohos (Ufc/g)	4.0*10 ⁴	7.8*10 ⁵	4.0*10 ³
Fosfatasa (mm.PNP/g.min)	Nivel Max: 0.00171	0.0125	0.0085
	Nivel Min: 0.009735	0.0108	0.0071
Proteasa (mm.PNP/g.min)	0.0156	0.0046	0.0028
	0.0069	0.0044	0.0008
Invertasa (mm.PNP/g.min)	0.1342	0.100	0.0785
	0.0042	0.088	0.0626
Coef. de correlación CIC/ CO	0.9967	0.5438	0.1362

I.G: Índice de germinación

NA: No aplica.

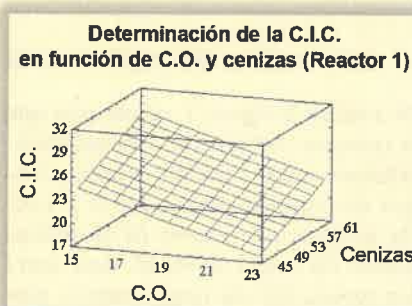
ND: No determinado

Durante el proceso de bioxidación se observa una gran variedad de microorganismos, como mesófilos, termófilos, mohos, levaduras, nematodos y enterobacterias, con gran actividad durante el proceso, siendo los responsables de los cambios de temperatura y de las relaciones por competencia ocasionadas por la eliminación de microorganismos patógenos y la consecuente estabilización de la MO²⁰. Se destacan los mesófilos y termófilos como las colonias más representativas durante el proceso. El análisis se centró en dos variables, dado que las enterobacterias y la Salmonella Sp son las variables dependientes o variables respuesta del proceso que, según la NTC 5167/04, permiten determinar si un compost es ambiental y agrónomicamente seguro.

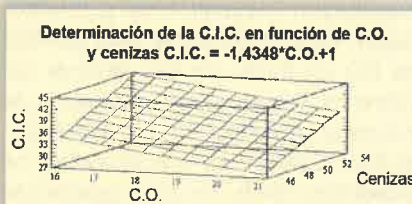
El proceso de bioxidación llevado a cabo en los tres reactores permite observar que en el reactor 1 se da un mejor proceso de estabilización de la materia orgánica, a juzgar por su baja conductividad (CE), incremento en la temperatura, buena reducción de la relación C/N, bajo nivel de respirometría, gran actividad enzimática al inicio del proceso y baja, al final, como una mejor correlación de las variables CIC (Capacidad de intercambio catiónico), CO y cenizas (Ver Figura 1).

Figura 1. Relación de la CIC con cenizas y CO en los tres reactores

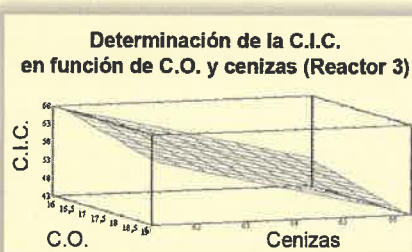
CIC R1 = 23,944 - 0,856482 * COR1 + 0,297074 * CENR1



CIC R2 = -1,4348 * COR2 + 1,25669 * R2



CIC R3 = 304,141 - 2,4026 * COR3 - 3,25121 * CENR3



3.1 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Tanto al inicio como al final del proceso de bioxidación se realizaron análisis de metales pesados y de microorganismos patógenos con el fin de garantizar la calidad sanitaria de los productos finales (Ver Tabla 2). Los metales pesados (Arsénico, Cadmio, Cromo, Mercurio, Níquel y Plomo), controlados por la norma técnica colombiana NTC 5167 del 2004 y la 40 CFR 5003 de la EPA, estuvieron dentro de los límites permitidos a excepción del Cromo que en algunos análisis superó los límites para disposición en suelos de uso agrícola, lo que hace que el compost obtenido sea clasificado como tipo B, no apto para uso agrícola. Respecto a este punto crítico, EPM ha logrado reducir en la fuente los niveles de Cr⁺⁶ por debajo de los 1.200 ppm a juzgar por últimos monitoreos realizados, lo que permitirá el uso de estos residuos sin restricciones y la formulación de un material seguro para la agricultura, como ocurre en Estados Unidos donde se realiza un control de vertimientos a todas las industrias de curtimbres que están obligadas a trabajar con Cr⁺³, el cual no es tóxico.

3.2 Análisis de fitotoxicidad

El análisis de fitotoxicidad estudia el efecto tóxico que puede tener un extracto acuoso de un material, en este caso los biosólidos, biosólidos poda y biosólidos celulosa residual. El estudio se realizó con semillas certificadas de rábano (*Raphanus Sativa*), de la variedad Crimpson Giant, con un porcentaje de germinación del 80%. En todos los análisis realizados se observa que los porcentajes de germinación estuvieron dentro de los intervalos esperados, es decir, no se observan efectos fitotóxicos sobre la germinación de esta semilla, lo que indica que en el material no se encuentran concentraciones importantes de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (fórmico, acético, propiónico, butírico y benzoico), que son los responsables de la inhibición del crecimiento en las plantas^{21 y 22}.

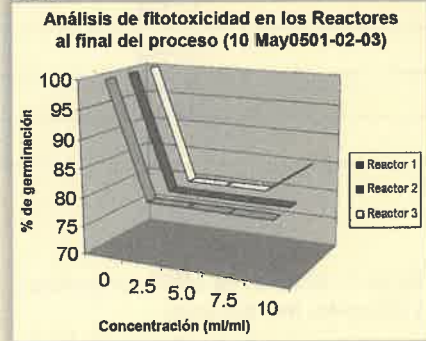
Los resultados observados demuestran que los materiales estudiados no presentan limitaciones para su uso en suelos, ya que desde el primer día de iniciado el proceso, el efecto tóxico observado es muy bajo, debido a que el porcentaje de germinación de las semillas es del 80 al 90%. Durante la última semana (6) se observa un pequeño descenso en el porcentaje de



germinación, lo que obedece al incremento en los niveles de conductividad registrados al final del proceso, especialmente en los reactores 2 y 3 (1506.7 y 995.50 respectivamente), indicando que estos materiales requieren un mayor período de com-

postación (>42días) que permita la oxidación de ciertos remanentes de ácidos y la precipitación de sales minerales, con lo que se reduce la conductividad, no obstante, cumplen con el límite mínimo de germinación para el modelo biológico, que es del 80%, según se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Fitotoxicidad al final del proceso

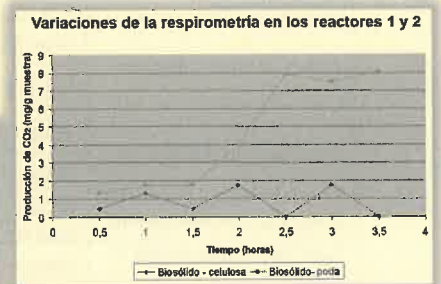


3.3 Análisis de respirometría

Al analizar la Figura 3, se observa que el compost del reactor 1 (biosólidos-celulosa residual 50:50), presenta rangos de respirometría entre 0 y 1.76. Por lo tanto, el compost de biosólidos-lodos de papel FAMILIA está entre los rangos 0-2 de respirometría, presentando una alta humificación, lo que es consecuente con las dos etapas observadas durante el proceso de bioxidación (mineralización y condensación de la MO), por la gran pérdida de CO en forma de CO₂ durante las primeras semanas del proceso y la posterior estabilización en el producto final. Cabe anotar que al reactor de biosólidos 100%, no se le practicó la prueba de respirometría porque, durante el proceso de bioxidación, no

cumplió con los parámetros fisicoquímicos; por lo tanto se descartó por ser un material no estabilizado

Figura 3. Variación de la producción de CO₂ en los reactores 1 y 2



3.4 Análisis de los Bioabonos

Conociendo los contenidos de las formulaciones, se procede a la preparación de los bioabonos que poseen cantidades importantes de N P y K, además de materia orgánica en forma de carbono orgánico oxidable y CIC por encima de 30 meq/100g, lo que los convierte en abonos de liberación lenta que garantizan el aporte de nutrientes residuales para las plantas durante varios años y disminuyen las pérdidas de nutrientes por lixiviación, con lo que se reducen los niveles de contaminación. En la Figura 4, se puede observar la composición de un triple 5. Los resultados de las 15 formulaciones obtenidas se presentan en la Tabla 3.

Análisis Garantizado	
NITROGENO TOTAL (N)	5%
FOSFORO, COMO (P ₂ O ₅)	5%
POTASIO, COMO (K ₂ O)	5%
MATERIA ORGANICA	25%
OLIGOELEMENTOS (Mg, Ca)	9%

Figura 4. Presentación de un bioabono triple cinco

Tabla 3. Resultados de las formulaciones mineralorgánicas de los bioabonos

Formulación	Compost	Nombre	Contenido			
			N	P	K	C
1	Biosol-celu.	Nitro simple	34	0	0	5
2	Biosol-celu	Fosfo simple	0	34	0	5
3	Biosol-celu	Potasio simple	0		45	5
4	Biosol-poda	Nitro simple	34	0	0	5
5	Biosol-poda	Fosfo simple	0	34	0	5
6	Biosol-poda	Potasio simple	0	0	34	5
7	Biosol.100%	Nitro simple	34	0	0	5
8	Biosol.100%	Fosfo simple	0	34	0	5
9	Biosol.100%	Potasio simple	0	0	34	5
10.	Biosol-celu	Mezcla máxima mineral orgánica	11	11	15	5
11	Biosol-poda	Mezcla máxima mineral orgánica	11	11	15	5
12	Biosol. 100%	Mezcla máxima mineral orgánica	11	11	15	5
13	Biosol-celu	Compuesto triple	5	5	5	0
14	Biosol-poda	Compuesto triple	5	5	5	0
15	Biosol.100%	Compuesto triple	5	5	5	0

Fuente: Laboratorios GIEM, Universidad de Antioquia (2007).

Una vez realizadas las formulaciones simples y compuestas, se practicaron análisis físicoquímicos y microbiológicos a los abonos obtenidos, con el fin de garantizar su sanitización. Se observó que los organismos microbiológicos (enterobacterias) se redujeron prácticamente a cero debido a la presión osmótica generada por la adición de sales de P y K, produciendo una solución hipertónica que origina la crenación de las células de los microorganismos. También se pudo observar cómo los niveles de cromo en las 5 muestras seleccionadas para análisis se redujeron considerablemente; este resultado posiblemente se deba a que, a través del compostaje y de la formulación de mezclas mineral-orgánicas, se reduce la disponibilidad de metales pesados presentes en los residuos, y por lo tanto, de la contaminación, debido a la formación de complejos oxidados, Carboxilatos (-COO⁻), que incrementan la capacidad de intercambio catiónico y ligan los metales, evitando sus pérdidas por lixiviación²³. Los resultados de los análisis físicoquímicos y microbiológicos practicados a los bioabonos se pueden observar en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Análisis físico químico de los abonos

TIPO DE ABONO	N	P	K	C	R C/N	Humedad	pH	Cr
Nitro simple (34-0-0-20)	43.95	0.52	0.63	8.12	15.62	27.67	6.48	64.30
Fosfosimple (0-34-0-5)	0.40	33.17	0.930	13.57	33.92	10.23	2.85	183.02
Potasio simple (0-0-45-5)	0.47	0.277	20.458	22.14	47.11	1.79	6.42	154.04
Compuesto (5-5-5-15)	6.54	4.25	2.00	15.91	2.43	20.74	5.81	125.46
Compuesto (11-11-11-10)	14.09	13.42	6.91	8.34	0.59	21.42	3.89	162.62

Fuente: laboratorios GIEM, Universidad de Antioquia (2007)

Tabla 5. Análisis microbiológico de los abonos

Tipo de Abono	Mesófilos	Termófilos	Mohos	Levaduras	Nemátodos/o protozoos	Entero bacterias	Salmonella Sp
Nitrosimple (34-0-0-20)	1.8 x 10 ⁹	0.0	0.0	0.0	Ausente	0.0	Ausente
Fosfosimple (0-34-0-5)	5.1 x 10 ⁸	1 x 10 ⁷	0.0	0.0	Ausente	0.0	Ausente
Potasiosimple (0-0-45-5)	1.4 x 10 ⁸	1 x 10 ⁷	0.0	0.0	Ausente	0.0	Ausente
Compuesto (5-5-5-15)	2.3 x 10 ⁹	1 x 10 ⁹	0.0	0.0	Ausente	0.0	Ausente
Compuesto (11-11-11-10)	2 x 10 ⁷	1 x 10 ⁷	0.0	0.0	Ausente	7.1 x 10 ²	Ausente

Fuente: laboratorios GIEM, Universidad de Antioquia (2007)

Los resultados anteriores constituyen una garantía de la calidad de los abonos producidos, dado que se optimiza el proceso de sanitización del biosólido, permitiendo su disposición sin restricciones, siempre y cuando EPM continúe controlando los niveles de cromo en los efluentes.

Conclusiones

El trabajo experimental logra demostrar que los biosólidos de la PTAR San Fernando se pueden estabilizar luego de ser sometidos a un proceso de biooxidación, con una proporción biosólido celulosa residual 50:50 v/v, con relación C/N de 20. También se logra una estabilización en menor grado al mezclar los biosólidos con restos de poda en la misma proporción, con una relación C/N de 16.25, lo que permite reducir el uso de restos de poda y optimizar el uso de los biosólidos, requiriendo un periodo de compostación más largo (mayor de 42 días) para garantizar una mejor estabilización de la materia orgánica en este reactor. Las mezclas biosólidos-celulosa y biosólidos-poda presentan una gran actividad microbiana y enzimática, lo que permite la sanitización de los productos finales, reduciendo riesgos sanitarios y ambientales. Se pudo comprobar que la relación C/N inicial es una de las variables con mayor incidencia en el proceso de biooxidación, presentando influencia directa en la veloci-

dad de mineralización y estabilización de la materia orgánica. Se encontró que el proceso fue más eficiente en el reactor 1 (biosólidos-celulosa) con relación C/N teórica inicial de 20, la cual se redujo a 11.80, para disminución total del 41%; seguido del reactor 2 (biosólidos-poda) con relación C/N inicial de 16.25, que se redujo a 13.30, para una disminución del 18% y mucho menos eficiente en el reactor 3 (biosólidos 100%) con relación de 6.7 que se incremento a 9.6. Los resultados de este estudio permiten confirmar que se logran altos niveles de actividad microbiana, con niveles óptimos de humedad (50-60%) y con temperaturas no muy altas (25-39°C), especialmente en los reactores 1 y 2 que son los que contie-



nen mayor concentración de sustrato. Esto demuestra que en los procesos de compostaje, la humedad tiene mayor influencia que la temperatura, la cual ha sido utilizada tradicionalmente para el control de este tipo de procesos; así, el incremento en la actividad del compost producido por el aumento en la temperatura puede ser reemplazado por un adecuado control de la humedad, como se pudo observar en este estudio. Los procesos biooxidativos están regidos por transformaciones fisicoquímicas, microbiológicas y enzimáticas que permiten diferenciar dos etapas importantes durante el proceso, y la mineralización que se caracteriza por la degradación rápida de la materia orgánica en compuestos inor-

gánicos simples, con la consecuente disminución del CO y la relación C/N, incremento de las cenizas y de la CIC. Posteriormente se presenta la etapa de condensación, donde se observa una variación menos marcada de las variables, durante las etapas finales del proceso, lo que sugiere la presencia de procesos de resíntesis de la materia orgánica.

Al analizar los resultados fisicoquímicos, microbiológicos y enzimáticos obtenidos en los tres reactores, se puede comprobar que es en el reactor 3 (biosólidos 100%) donde se da una menor estabilización de la materia orgánica, por el poco sustrato disponible y el exceso de humedad.

En cuanto a la capacidad de sanitización, donde mejor se dio el proceso fue en el reactor 1 (biosólido-celulosa), ya que mostró mayor reducción de patógenos (99%), frente a los reactores 2 y 3 que mostraron reducciones del 96 y 76 % respectivamente. Además este reactor alcanza mayores niveles de actividad enzimática, fosfatasa (0.017 mM PNP/min.), proteasa (0.016 mM R-NH₂/min) e invertasa (0.134 mM ER/min) desde las primeras semanas del proceso de biooxidación, los cuales se reducen al final del mismo, a valores muy inferiores que los observados en los reactores 2 y 3.

El análisis de fitotoxicidad muestra que los productos obtenidos en los tres reactores presentan un porcentaje de germinación superior al 80%, que es el límite permitido para el rábano. Preocupa la caída en los índices de germinación (IG) presentados en la última semana del proceso, producto del incremento en la conductividad, especialmente en los reactores 2 y 3, lo que sugiere que estos dos produc-

tos requieren un mayor tiempo para su estabilización, pues podrían ser fitoinhibidores al ser dispuestos en suelos.

El análisis de metales pesados controlados por la Norma Técnica Colombiana (NTC 5167 del 04 y la 40CFR503 de la EPA) demuestra que, a excepción del cromo, los demás metales controlados no sobrepasaron los límites establecidos por estas normas durante el proceso de biooxidación.

En los productos finales se observó una gran disminución en las concentraciones de cromo (< 200 ppm), lo cual pudo obedecer a los ligandos presentes en el material estabilizado que retiene los iones metálicos como el Cr⁺⁶.

La medición de la actividad enzima-sustrato permite optimizar los procesos de estabilización de compost, pues resulta ser un procedimiento más rápido y económico que los análisis físicoquímicos comunes.

Las formulaciones mineral-orgánicas con las que se produjeron los abonos permitieron la obtención de un producto muy estable, totalmente sanitizado, que no representa ningún riesgo ambiental ni sanitario, según lo corroboran los análisis físico químicos, microbiológicos y fitotóxicos, lo que nos permite recomendar dichos productos como abonos tipo A por su ausencia total de *Salmonella sp.*, enterobacterias inferiores a 1 x 10³ UFC/g peso seco, bajos niveles de metales pesados, ausencia de fitotóxicos y presencia de macro nutrientes como el N, P y K en concentraciones adecuadas, además de oligoelementos como el calcio, magnesio y zinc, que contribuyen a optimizar el desarrollo foliar de las especies vegetales.



A pesar de que en el proceso no se observó la fase termófila, si hubo actividad enzimática y reducción de patógenos por competencia, lo que permitió pasar de un biosólido tipo B a un bioabono tipo A y EQ (Exceptional Quality), dado que, con los procesos de biooxidación, se redujeron los patógenos y se diluyen los metales pesados por la presencia de ligandos en el material estabilizado.

Se logra demostrar que el método de Punto Final (PF) de titulación con NaOH, 0.8N, utilizado como parámetro de madurez del compost es bastante efectivo para medir la tasa de respiración del mismo, dado que los niveles de respirometría observados en los reactores 1 y 2 estuvieron en el orden de (0 a 1.7 y 1.32 a 8.09 mgCO₂/h) respectivamente, que los clasifica como materiales estabilizados, confirmándose también por este método la mayor eficiencia del proceso de biooxidación observado en el reactor 1 de biosólidos celulosa residual, que presenta niveles más bajos de respirometría; se demostró también que el incremento en el tiempo del compost unido a la mineralización de la materia orgánica disminuyen los sólidos volátiles y reducen las tasas de respiración, es decir, la demanda de oxígeno y la producción de CO₂, como consecuencia de la poca actividad de los microorganismos en el material estabilizado.

El análisis estadístico con el software STATGRAFICS plus V4.0 permite obtener correlaciones entre el tiempo del proceso y los diferentes parámetros físicoquímicos, encontrando correlaciones importantes entre CIC-CO en el reactor 1; se observó que la CIC tiene un comportamiento ajustado a un modelo square root-X, con un intervalo de confianza mayor del 99% y una muy buena correlación entre sus datos (Coeficiente = 0.996706), lo cual significa que el reactor 1 cumple con los parámetros de estabilidad para CIC (mínimo 30meq/g e incrementándose en el tiempo) y de CO (mínimo 15% y disminuyendo en el tiempo), lo que indica que cumple con los parámetros

de estabilidad para CIC y CO establecidos por la NTC5167/04; además, se observa una correlación importante en las cenizas (0.915), con un intervalo de confianza del 95%.

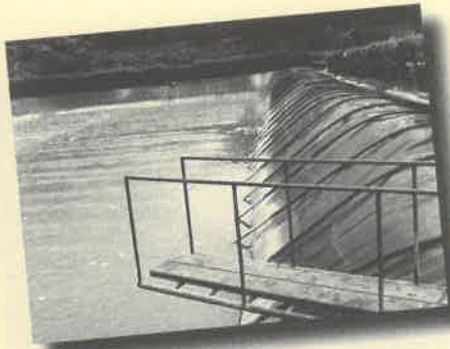
Al realizar las relaciones de superficie entre las variables de mayor incidencia en la estabilización del compost (CIC, CO y cenizas), se puede observar que los reactores 1 y 2 se ajustan a los parámetros establecidos (CIC>30meq/g, CO>15% y cenizas <60%), lo que confirma los procesos de condensación observados en estos dos reactores, ésto se reflejará al aplicarlos como enmiendas o fertilizantes.

Recomendaciones

Para trabajar con volúmenes mayores, de mezcla de biosólidos con materiales de soporte, se recomienda el uso de maquinaria o de reactores de tubo giratorio para la preparación de tales mezclas, dado que es bastante difícil la homogenización de los materiales por las características plásticas del biosólido. También es necesario ser muy estricto en el control de la humedad y en la relación C/N, dado que son parámetros de vital importancia para lograr la estabilización de la materia orgánica.

Las autoridades ambientales deberán implementar legislaciones sobre lodos y biosólidos mucho más fuertes, que permitan controlar la gestión de las plantas de tratamiento en nuestro país; de lo contrario, el panorama de desconfianza sobre el uso y disposición de los lodos y biosólidos continuará vigente.

El presente estudio sugiere una nueva forma de sanitización de los biosólidos, que permite garantizar aún más la disposición de los bioabonos; consiste en la generación de presión osmótica mediante la adición de sales (fosfatos y cloruros), con lo cual se incrementa la concentración de nutrientes en el suelo y se logra la crenación de las células de microorganismos,



permitiendo una reducción de patógenos superior a la conseguida con otros métodos de esterilización.

Con el ánimo de realizar estudios que vayan más allá de los ensayos a nivel de laboratorio, se hace necesario determinar costos, tanto de producción a nivel industrial, como de aplicación en condiciones de campo, para definir la competitividad de estos productos respecto a los abonos orgánicos y enmiendas de suelos existentes en el mercado.

Bibliografía

- ARIAS G., María Victoria. "Biosólidos en Colombia". En: Revista El Reto. Vol. 48. Bogotá, 2003. pp. 10-17.
- MINISTERIO DE SALUD. COLOMBIA. Resolución 02309. Artículo 2, por el cual se clasifican los residuos sólidos". Bogotá: El Ministerio, 1996.
- DOMÉNECH, Xavier. "Química Ambiental, el impacto ambiental de los residuos". Madrid: Miraguano Ediciones. España, 1998. pp. 14-51
- EPELA VEILIKONJA, Bolta. et.al. "Microbial community structure during composting with and without mass inoculation". En: Compost Science & Utilization. Vol. 5. (s.l.) 2003. pp. 6-15.
- GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM). "Producción de abono en la industria avícola". En: Cuadernos Avícolas. Vol. 11. Fenavi, Bogotá, 2000. pp. 5-32.
- HUANG, G.F.; WONG, J.W.; WU, Q.T. and Nagar. "Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust". En: Waste Management. Vol. 24. (s.l.) 2004. pp. 805-813.
- J.Mc. FARLAND, Michael. "Biosolids Engineering". New York: Mc.Graw Hill, 2001. pp. 3129-3170.
- MAISON MARAÑON, Elena. "Problemas de ingeniería ambiental". Oviedo. Departamento de Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente. 2001. pp. 243-247
- MELCALF & EDDY, Inc. "Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización". New York: Mc. Graw Hill, 1996. pp. 916-945.
- MESAS, Juan Antonio. "Valorización agronómica de los biosólidos, consideraciones técnicas, económicas y medio ambientales". En: Revista Residuos. Vol. 72. Madrid. 2003. pp. 68-74.
- RIVERO, Carmen; CHIRENJE, T.; MA, L.Q. y MARTÍNEZ, G. "Influence of compost on soil organics matter quality under tropical conditions". En: Geoderma. Vol.145 (s.l.) 2004. pp. 355-361.
- SCHESINGER, William H. "Biogeoquímica. Un análisis del cambio global". Barcelona: Ariel, 2000. p.576.
- STOFELLA, Peter J. STOFELLA, Braian A: Kahn. "Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems". New York: Lewis Publishers, 2001. pp.96-117
- TCHOBANOGLIOUS, George. "Gestión integral de residuos sólidos". New York: McGraw Hill, 1994. pp. 700-783
- TIQUIA, S. et al. «Extacellular enzyme profiles during composting of poultry manure and yard trimmings". En: Process Biochemistry. N° 36. (s.l.) 2001.
- ¹ DOMÉNECH, Xavier. Química Ambiental, el impacto ambiental de los residuos. Madrid, Miraguano; 1998. pp. 14 - 51
- ² MINISTERIO DE SALUD. COLOMBIA. Resolución 02309 "Artículo 2: Por el cual se clasifican los residuos sólidos". Bogotá: El Ministerio, 1996.
- ³ ARIAS G., María Victoria. "Biosólidos en Colombia". En: Revista El Reto; N°48. Bogotá. 2003. pp. 10-17.
- ⁴ Op. Cit.
- ⁵ GRUPO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES et al. Informe Final. Análisis prospectivo de disposición de biosólidos: PTAR San Fernando, Medellín: GIA, UPB, EIA; CNPML, 2001, anexo 8.
- ⁶ MESAS, Juan Antonio. "Valorización agronómica de los biosólidos, consideraciones técnicas, económicas y medio ambientales". En: Revista Residuos, N° 72. Bogotá, 2003. pp. 68-74.
- ⁷ RIVERO, Carmen; CHIRENJE, T.; et al. "Influence of compost on soil organics matter quality under tropical conditions". En: Geoderma, s.l, N° 145. 2004; pp. 355-361.
- ⁸ SCHESINGER, William H. Biogeoquímica. Un análisis del cambio global. Barcelona: Ariel. 2000.
- ⁹ GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES (GIEM). "Producción de abono en la industria avícola". En: Cuadernos Avícolas, N° 11. Bogotá, 2000. pp. 5-32.
- ¹⁰ Carbono/Nitrogeno
- ¹¹ DIAZ, Op cit. pp. 103-171.
- ¹² MELCALF & EDDY, Op cit. pp. 916-945
- ¹³ Ibid, pp. 916-945
- ¹⁴ MAISON MARAÑON, Elena. Problemas de ingeniería ambiental. Oviedo, Departamento de Ingeniería y Tecnología del Medio Ambiente. España: 2001. pp. 243-247.
- ¹⁵ TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión integral de residuos sólidos. New York: McGraw Hill. 1994. pp. 700-783
- ¹⁶ MAISON MARAÑON, Op cit. pp. 243-247.
- ¹⁷ M. J. McFARLAND, Biosolids engineering, McGraw Hill Professional, 2000. pp. 3129-3170.
- ¹⁸ MAISON MARAÑON, Op cit. pp. 243-247
- ¹⁹ McFARLAND, Op cit. pp. 3129-3170.
- ²⁰ EPELA VEILIKONJA, Op cit. pp. 6-15.
- ²¹ STOFELLA, Op cit. pp.96-117.
- ²² HUANG, G.F.; WONG, J.W.; WU, Q:T. and Nagar. "Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust". En: Waste Management. (s.l.) N° 24. 2004. pp. 805-813.
- ²³ TIQUIA, Op cit. pp. 1057-1065.