

# FACTIBILIDAD DE DISPOSICIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMBINADA

ADRIANA MARÍA QUINCHÍA\*  
DORA MARÍA CARMONA\*\*

## RESUMEN

Por medio de dos pruebas piloto, la Escuela de Ingeniería de Antioquia y la Universidad Pontificia Bolivariana, con el apoyo de Empresas Públicas de Medellín, se propusieron determinar la factibilidad de disposición de los biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, considerándolos como potenciales rehabilitadores de suelos degradados y como materiales de compostaje.

Las pruebas realizadas en la investigación incluyeron la caracterización fisicoquímica y microbiológica del biosólido, la cual permitió establecer la no peligrosidad del material bajo los criterios de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad e inflamabilidad; la identificación de aportes de sustancias al medio por la aplicación de los biosólidos en suelos degradados y el establecimiento de las tasas más recomendadas de aplicación directa para la rehabilitación de áreas degradadas en el trópico, en lugares donde no se establezcan cultivos ni se adelanten actividades de ganadería. De igual forma se determinó el potencial del biosólido como material susceptible de compostaje, la evaluación del proceso y los materiales más recomendados; se obtuvo un material de excelente calidad orgánica que aporta nutrientes. Pese a lo anterior, se debe aclarar que el material presenta organismos patógenos y una carga alta de cromo, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de usarlo directamente; además, para el caso del compost, se supera la carga de cromo encontrada en recomendaciones de la normatividad colombiana.

**PALABRAS CLAVE:** biosólido; valorización biológica de biosólidos; disposición directa de biosólidos; compostaje de biosólidos.

---

\* Ingeniera Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Especialista en Ingeniería Ambiental, UPB. Magíster en ingeniería con énfasis en ambiental, UPB. Docente EIA. Grupo de Investigación Gabis –Gestión del Ambiente para el Bienestar Social–, EIA. [pfadqui@eia.edu.co](mailto:pfadqui@eia.edu.co)

\*\* Ingeniera Química de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Especialista en Ingeniería Ambiental, UPB. Magíster en ingeniería con énfasis en ambiental, UPB. Investigadora del Grupo de Investigaciones Ambientales –GIA–, UPB. [dcarmona@upb.edu.co](mailto:dcarmona@upb.edu.co)

## ABSTRACT

By means of two pilot tests, Antioquia School of Engineering and Pontifical Bolivarian University, with the support of Public Service Enterprises of Medellín, decided to determine the feasibility for disposition of biosolids originating from the residual water treatment plant San Fernando considering them as potential rehabilitators for degraded soils and composting materials. The tests made in the research included the physicochemical and microbiological characterization of the biosolid, which allowed to establish that the material is not dangerous under criteria of corrosivity, reactivity, explosivity, toxicity, and inflammability; the identification of contributions of substances to environment by the application of biosolids in degraded soils and the establishment of the most recommended rates of direct application for the rehabilitation of degraded areas in the tropic, in places without cultures or cattle activities. Similarly, it was determined the potential of the biosolid as susceptible material for composting, the evaluation of the process and the most recommended materials, having as result an excellent organic quality material which provides with nutrients. In spite of that, it is due to clarify that the material presents pathogenic organisms and a high chromium load which must be considered at the time of using directly this material; additionally, for the case of compost, it is exceeded the chromium load accepted by the Colombian regulation.

**KEY WORDS:** biosolids; direct disposal of biosolids; solids composting

## INTRODUCCIÓN

Los biosólidos son lodos generados en el tratamiento de aguas residuales y sometidos a un proceso de estabilización mediante una degradación biológica de carácter anaerobio. Éstos han sido definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) en su código 40 CFR 503 como "sólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales y estabilizados biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes, bajo contenido de microorganismos patógenos, presencia permisible de metales pesados, que se puede utilizar como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos, de acuerdo con la composición fisicoquímica del biosólido y la vocación de uso del suelo".

La disposición de los biosólidos demanda un manejo muy cuidadoso por la cantidad que alcanzan y por los riesgos ambientales que, en algunos casos, pueden representar ante la posibilidad de contener sustancias contaminantes provenientes de las

aguas tratadas. Además de la facilidad o dificultad con la cual se realiza la disposición y de los costos asociados a ella, también deben considerarse aspectos de relevancia, como son las características del agua tratada, las políticas ambientales de orden local y nacional, la tecnología empleada en la disposición, los factores agronómicos del lugar de disposición así como los usos del suelo.

Las anteriores consideraciones hacen prioritario el avance en el conocimiento de opciones que permitan disponer o utilizar este material en grandes cantidades con viabilidad económica, técnica y ambiental para nuestra región. Entre las alternativas más usadas a escala mundial para la disposición de este material, se encuentran la ceramización, la vitrificación, la incineración, la disposición en monorrellenos y rellenos sanitarios, la valorización agrícola del biosólido por medio de procesos de compostaje y su disposición directa en terrenos degradados de minería o en terrenos con actividades silvopastoriles y de paisajismo.



Estas opciones de disposición no siempre garantizan la inocuidad en el ambiente al utilizar el material en cuestión, lo que hace necesario que se tengan en cuenta las consideraciones técnicas que permitan resolver inquietudes como: ¿El biosólido generado en una planta de tratamiento de aguas residuales –PTAR– combinada (aguas residuales industriales y domésticas) se puede considerar como un residuo peligroso y cuáles son sus características fisicoquímicas y microbiológicas?, ¿cuáles serían los posibles impactos ambientales generados por la aplicación directa de dichos biosólidos en los suelos o en forma compostada?, ¿qué normatividad nacional o internacional existe que haga referencia a la evaluación de la peligrosidad de un biosólido y su aplicación de acuerdo con las características presentadas por el material?

Para dar respuesta a alguno de estos interrogantes, se desarrolló este trabajo de investigación basado en el montaje de dos ensayos que permitieran determinar la viabilidad de la disposición de los biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando de Empresas Públicas de Medellín (EPM), en las modalidades de “*disposición directa del biosólido en suelos degradados*” con fines de recuperación y el “ *acondicionamiento del biosólido mediante el proceso de compostaje*” considerando estas dos alternativas como unas de las más viables para nuestro caso local.

## 1. MATERIALES UTILIZADOS

En el desarrollo del experimento se utilizaron los siguientes materiales: un suelo tomado de una zona de depósito de escombros, el cual presenta condiciones precarias de fertilidad y bajo potencial de productividad; para el proceso de compostaje los materiales se tomaron de residuos de madera y

equinaza (cagajón) procedentes de la zona donde se instalaron las celdas de compostaje; los biosólidos para los dos ensayos fueron suministrados por la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando operada por Empresas Públicas de Medellín.

## 2. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

El primer paso de la experimentación fue la caracterización física, química y microbiológica del biosólido, bajo el estándar presentado en la norma 40 CFR 503 de la EPA. En toxicidad por lixiviación se siguieron las pautas establecidas en la denominada prueba de “TCLP” (Toxic Characteristic Leaching Procedure), establecida en el estándar 1311 de la norma 40 CFR 261. Ambas pruebas se basan en la determinación de los lineamientos para aplicación superficial de biosólidos y fueron tomadas como criterios técnicos de comparación dada la ausencia de normatividad nacional.

El estudio contó, además, con una etapa preliminar de selección de sitios para cada uno de los ensayos, la cual requirió el cumplimiento de las condiciones mínimas exigidas por los estándares internacionales para los casos de estudio de la disposición del biosólido. También se realizaron planes de manejo ambiental así como medidas de prevención ante algún tipo de contaminación ambiental por el desarrollo de los ensayos y fueron presentados a las autoridades ambientales de los municipios donde se desarrollaron las pruebas.

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores y la comparación con los rangos recomendados por la EPA para la aplicación del biosólido en suelos.

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del biosólido usado en los ensayos y valores límites establecidos por la EPA en la norma 40 CFR 503 para biosólidos que serán dispuestos en suelos

METALES PESADOS	BIOSÓLIDO PTAR San Fernando mg/kg base seca	EPA Concentración máxima, mg/kg base seca
1 Arsénico	Menor de 0,01	75,00
2 Cadmio	Menor de 0,01	85,00
3 Cinc	1695,04	7500,00
4 Cobre	271,50	4300,00
5 Cromo*	2613,67	-
6 Mercurio	Menor de 1,76	57,00
7 Níquel	86,73	420,00
8 Plomo	170,95	840,00
9 Selenio	Menor de 0,05	100,00
10 Molibdeno	Menor de 4,90	75,00
11 Aluminio	105669,42	
<b>Características físicas</b>		
Sólidos totales	39,71%	
Retención de humedad	85,55% a 0,3 atm; 72,72% a 1,5 atm	
Material volátil %	11,36	
Poder calorífico cal/g	1800,00	

Fuente: Datos reportados por el Laboratorio Ambiental de la UPB. Mayo 9 de 2001

\* Eliminado por la EPA, con base en evaluaciones de toxicidad y acumulación en suelos

**Tabla 2** Análisis de toxicidad por lixiviación, reactividad, corrosividad e inflamabilidad del biosólido utilizado para el ensayo de disposición superficial en suelos

METALES	Método de Análisis	Biosólido TCLP – Lixiviación mg/l	Límite de detección mg/l	Regulación EPA 40 CFR 261 mg/l
Arsénico	Polarografía	Menor 0,0005	0,0005	5,0
Bario	AA*	Menor 0,04	0,04	100,0
Cadmio	AA.	menor 0,0005	0,0005	1,0
Cromo	AA.	4,34	0,003	5,0
Mercurio	A.A.VF**	menor 0,065	0,065	0,2
Níquel	AA.	0,491	0,005	
Plomo	AA.	1,04	0,001	5,0
Plata	AA.	menor 0,01	0,01	5,0
Selenio	Polarografía	menor 0,005	0,005	1,0
Corrosividad, pH		8,35		Entre 2 y 12
Ignición		NO		
Reactividad		NO		
Inflamabilidad		NO		

\* A.A: Absorción atómica

\*\*VF: Técnica de vapor frío.

Resultados reportados por el Laboratorio Ambiental de la UPB. Mayo de 2001



Para la clasificación del biosólido se tomaron en cuenta como criterios técnicos de referencia los establecidos por la EPA en su norma 625/R-95/001, basada en la concentración de metales pesados y en el contenido de organismos patógenos de la siguiente manera:

- **Clasificación del biosólido según la concentración de metales pesados**

*Concentración máxima:* ésta es la máxima concentración en mg/kg de un contaminante inorgánico encontrado en un biosólido que será aplicado como abono al suelo. Si los contaminantes superan estos niveles, el biosólido no puede ser aplicado al suelo.

*Biosólidos de calidad excepcional EQ (Exceptional Quality):* se refiere a biosólidos que poseen niveles bajos de contaminantes y que no generan riesgos de efectos adversos en el medio, igualmente, presentan ausencia de patógenos y una reducción de atracción de vectores.

*Concentración límite de contaminantes PC (Pollutant concentration):* es la máxima concentración en mg/kg de un contaminante inorgánico en un biosólido y aplica a la clasificación de biosólidos clase

B<sup>1</sup>. Posee los mismos niveles bajos de contaminantes del biosólido EQ, pero con niveles detectables de patógenos que, en general, pueden no presentar amenaza para la salud pública.

*Carga acumulativa de contaminante CPLR (Cumulative Pollutant Loading Rate):* ésta es la máxima cantidad de un contaminante inorgánico que puede ser aplicada sobre un área de suelo. Se denominan así a los biosólidos con una carga acumulada de contaminantes que exceden al menos uno de los criterios de concentración límite de contaminantes establecido para los biosólidos de clase EQ y PC, pero cumplen con los criterios de concentraciones máximas que se registran en la tabla 3.

*Carga anual de contaminantes APLR (Annual Pollutant Loading Rate):* ésta es la máxima carga anual de cada contaminante que puede ser aplicada al suelo en kg/ha. Son biosólidos cuya tasa anual de aplicación de contaminante exceden las concentraciones límite para biosólidos EQ, pero cumplen con las concentraciones máximas permitidas en aplicación al suelo.

En la Tabla 3 se presentan los límites establecidos por la EPA para cada uno de los criterios anteriores:

1 Esta categoría se incluye en la clasificación de acuerdo con el contenido de patógenos

**Tabla 3.** Límites de sustancias contaminantes para aplicación de lodos en suelos

Contaminante	Concentraciones máximas para biosólidos aplicados al terreno	Concentraciones límite para biosólidos <sup>1</sup> EQ y PC (mg/kg)	Cargas acumulativas para biosólidos CPLR (Kg/Ha)	Tasas anuales de aplicación de contaminante para lodos <sup>1</sup> (mg/kg) APLR (kg/ha/año)
Arsénico	75	41	41	2,0
Cadmio	85	39	39	1,9
Cromo <sup>2</sup>	3000	1200	3000	150
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0,85
Molibdeno <sup>3</sup>	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selenio <sup>2</sup>	100	36	100	5,0
Cinc	7500	2800	2800	140
Aplicado a:	Todos los biosólidos que son aplicados al terreno	Biosólidos en volumen y empacados	Biosólidos en volumen	Biosólidos empacados <sup>4</sup>

Fuente: EPA. 625/R-95-001. North Carolina : EPA, 1995. s.p.

1 Base seca

2 El cromo fue eliminado de la regulación y el selenio fue modificado en 1995

3 El límite para molibdeno fue eliminado desde la regulación de 1994

4 Biosólido comercializado o transportado en bolsas u otro recipiente

#### • Clasificación del biosólido de acuerdo con el contenido de patógenos

Según la EPA 625/R-92-013 de 1999, con base en criterios microbiológicos los biosólidos se pueden clasificar en:

*Lodo residual clase A:* es un biosólido cuyo contenido de patógenos está por debajo de niveles detectables y puede ser aplicado al suelo sin restricciones de patógenos. La densidad de coliformes fecales puede ser menor que 1000 número más probable por gramo sólidos totales, base seca (NMP/g). O la densidad de la bacteria *Salmonella sp* puede ser menor que 3 NMP/ 4 g sólidos totales, base seca.

*Lodo residual clase B:* Es un material que posee microorganismos patógenos, pero permite garanti-

zar que el contenido de patógenos se reduce a un nivel tolerable en condiciones específicas de uso que minimicen el potencial de contacto de los patógenos con humanos o animales.

Dadas las clasificaciones anteriores, el biosólido en análisis se define como de tipo B por la presencia de microorganismos patógenos, clase PC, dada la presencia de algunos contaminantes; y con los criterios de reactividad, corrosividad e inflamabilidad, se clasifica como no peligroso.

#### 2.1 PRUEBA 1: DISPOSICIÓN SUPERFICIAL DE BIOSÓLIDOS EN SUELOS

La prueba 1 consistió en la disposición superficial del biosólido mezclado con un suelo en diversas



proporciones (20, 30, 40 y 50%), con la finalidad de observar las variaciones físicas, químicas y de desarrollo vegetativo que puede sufrir un suelo poco fértil ante la aplicación del biosólido. El suelo utilizado para este ensayo fue tomado de un lote en el kilómetro 5, vía variante de Caldas (Antioquia), margen derecha del río Medellín, que mostró inicialmente bajos contenidos de nutrientes, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico; además, un pH que lo clasifica como un suelo ácido. De igual forma, los contenidos de metales pesados detectados en el suelo se encontraron en niveles muy bajos, por lo cual se pudo establecer la ausencia de contaminación por acumulación de metales pesados. Los valores de la caracterización del suelo se reportan en las tablas 4 y 5.

**Tabla 4.** Criterios químicos del suelo usado para las mezclas biosólido-suelo

CRITERIO	VALOR EN BASE SECA
pH	4,9
% de material orgánica.	0,51
Capacidad de intercambio catiónico efectiva. (meq/100g de suelo)	3,2
% de retención de humedad	24,76% a 0,3 atm 13,65% a 1,5 atm
Calcio, meq/100 g	0,8
Magnesio, meq/100 g	0,3
Potasio, meq/100 g	0,08
Fósforo, ppm	1
Hierro, ppm	24
Manganeso, ppm	16
Nitratos, ppm	No detectado
Amonio, ppm	1
Arena %	58
Limo %	28
Arcilla %	14

Datos reportados por el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Mayo 2001.

**Tabla 5.** Contenido de metales pesados en el suelo usado para las mezclas

CONTENIDO DE ELEMENTOS TRAZA	CONCENTRACIÓN mg/kg b.s.
Aluminio, Al	-
Arsénico, As	Menor de 0,01
Cadmio, Cd	Menor de 0,01
Cinc, Zn	53,78
Cobre, Cu	25,61
Cromo total, Cr	Menor de 0,05
Mercurio, Hg	Menor de 1,40
Níquel, Ni	9,91
Plomo, Pb	10,71
Selenio, Se	Menor de 0,05

Datos reportados por el Laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. Mayo de 2001

Para el ensayo de disposición superficial, las obras de adecuación del terreno contemplaron la impermeabilización del fondo de cada era, la instalación de un sistema de drenaje en espina de pescado para facilitar el movimiento y la recolección de las aguas percoladas de las eras, la construcción de fosos de recolección de dichas aguas, la instalación de un geotextil entre la mezcla biosólido-suelo y el sistema de drenaje y, finalmente, la siembra de semillas de dos bioindicadores (*Brachiaria decumbens* y *Raphanus sativus*), con el fin de verificar cambios en las propiedades productivas del suelo mezclado con el biosólido así como las posibles acumulaciones de metales pesados en las plantas. La prueba contó con 6 eras conformadas con mezclas en diferentes proporciones:

Era 1: 100% suelo

Era 2: 80% suelo: 20% biosólido

Era 3: 70% suelo: 30% biosólido

Era 4: 60% suelo: 40% biosólido

Era 5: 50% suelo: 50% biosólido

Era 6: 100% biosólido

En las fotografías de la 1 a la 4 se observan los pasos de la conformación de las eras y siembra de los bioindicadores.



Fotografías 1 y 2 Conformación de las eras



Fotografías 3 y 4 Mezcla del material y eras sembradas

### 2.1.1 Cambios encontrados en las mezclas

Las variaciones en las condiciones físicas de las mezclas no fueron significativas, predominando

para las distintas proporciones de mezcla una textura franco arenosa. En las variables químicas se observaron incrementos en el pH, en el porcentaje de materia orgánica y en la capacidad de intercambio catiónico, que indican una respuesta efectiva después de la mezcla dado el aporte de materia orgánica por parte de los biosólidos. En los cambios se pudo establecer una mayor respuesta en la era 2 (20% biosólido), lo cual se explica ante la mayor facilidad para la incorporación de los materiales; la era 2 logró una mayor homogeneidad, porosidad y percolación del agua lluvia, lo que redundó en una mayor rapidez del proceso de oxidación de la materia orgánica presente en el biosólido y en la liberación de nutrientes; lo anterior se puede observar en la tabla 6.

En lo referente al contenido de metales pesados, se detectaron 5 elementos traza en las mezclas: Cr, Ni, Cu, Pb y Zn. Si se comparan los resultados con la norma técnica SANEPAR, 1999 de Brasil (tomada como referencia técnica dada la ausencia en la legislación colombiana de criterios límite para estos metales pesados en suelos), la era 2 reportó los valores más bajos en concentración, excediendo sólo el valor del cromo; las demás eras mostraron más de un elemento traza por encima del valor de referencia, por lo cual no se consideran recomendables para usar como un sustrato para siembra de especies vegetales que puedan ingresar en la cadena trófica. Estos valores se presentan en la tabla 7.

En cuanto al contenido de microorganismos, todas las eras presentaron al final del ensayo coliformes totales, con los valores más altos para las eras 5 y 6, que tienen mayor aporte de biosólidos y, por tanto, de materia orgánica proveniente de desechos domésticos. Todas las parcelas fueron positivas para mohos y levaduras, negativas en nemátodos, mientras que se reportó *salmonella sp.* en las eras 3, 4 y 6. Se observó, en estas mismas eras, abundancia de mohos para todas las muestras, y debe considerarse importante la presencia de Deuteromycetes que pueden llegar a ser fitopatógenos de plantas superiores, saprófitos o productores de toxinas.



**Tabla 6.** Análisis químicos de las mezclas, dos meses después de la conformación de las eras.

CRITERIO	ERA 1 (100% <i>s</i> )	ERA 2 (20% <i>b</i> :80% <i>s</i> )	ERA 3 (30% <i>b</i> :70% <i>s</i> )	ERA 4 (40% <i>b</i> :60% <i>s</i> )	ERA 5 (50% <i>b</i> :50% <i>s</i> )	ERA 6 (100% <i>b</i> )
pH	4,9	6,4	6,1	5,8	6,2	6,5
Materia orgánica (%)	0,3	3,7	1,5	1,5	1,8	24,8
CICef. (meq/100 g des)	3,2	19,6	13,8	12,6	18,9	56,8
Calcio meq/100 g	0,8	18,4	13	11,7	17,7	52,5
Magnesio meq/100 g	0,3	1	0,7	0,7	1	3,6
Potasio meq/100 g	0,08	0,18	0,13	0,16	0,18	0,68
Fósforo (ppm)	1	195	99	100	113	236
Hierro (ppm)	24	243	132	119	142	302
Manganeso (ppm)	16	17	11	13	13	26
B (ppm)		1,2	0,8	0,9	1	4,4
NO <sub>3</sub> (ppm)		122	156	40	30	217
NH <sub>4</sub> (ppm)	1	31	134	30	12	273

Datos suministrados por los laboratorios de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y Laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana. Julio 2001

**Tabla 7.** Comparación de metales pesados detectados en las mezclas al final del ensayo y los límites establecidos para concentraciones de estos metales en suelos que han tenido aplicaciones de biosólidos\*.

ERA	CROMO TOTAL Límite: 100 mg/kg b.s.	NIQUEL Límite: 30 mg/kg b.s.	COBRE Límite: 50 mg/kg b.s.	PLOMO Límite: 50 mg/kg b.s.	CINC Límite: 150 mg/kg b.s.
1 (100 <i>s</i> )	0,54	10,83	18,60	4,28	39,60
2 (20 <i>b</i> :80 <i>s</i> )	443,96	14,42	30,37	40,68	85,14
3 (30 <i>b</i> :70 <i>s</i> )	758,51	15,29	37,02	56,55	120,50
4 (40 <i>b</i> :60 <i>s</i> )	1314,53	16,25	50,43	68,01	165,90
5 (50 <i>b</i> :50 <i>s</i> )	1788,97	21,65	57,91	76,45	194,50
6 (100 <i>b</i> )	3077,03	88,04	270,69	168,16	1111,40

\*Fuente de los límites de metales pesados: Norma Técnica SANEPAR, Brasil, 1999

Datos de las eras reportados por el Laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana

### 2.1.2 Características de los lixiviados:

En la tabla 8 se presentan los promedios de los criterios medidos diariamente en los lixiviados durante el desarrollo de la prueba.

Acercas de la calidad medida en el lixiviado obtenido de las parcelas durante los primeros 15 días del ensayo, cuando se reportaron los mayores valo-

res de lavado de las eras, se puede establecer que todos los niveles de metales pesados detectados en las aguas lixiviadas están por debajo de los límites máximos permitidos para vertimientos líquidos que serán aportados a suelos de uso agrícola de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984 reglamentario del Código de Recursos Naturales de Colombia; tal como se reporta en la tabla 9.

**Tabla 8.** Criterios promedio de características de los lixiviados generados por las eras

CRITERIO	ERA 1 (100s)	ERA 2 (20b:80s)	ERA 3 (30b:70s)	ERA 4 (40b:60s)	ERA 5 (50b:50s)	ERA 6 (100b)
pH	7,17	7,27	7,74	7,49	11,78	6,9
DBO <sub>5</sub>	9,29	9,48	4,8	10,48	13,99	44,71
DQO	35,81	107,06	27,94	63,54	139,56	270,89

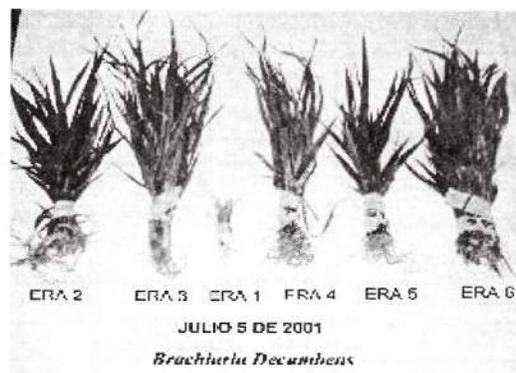
**Tabla 9.** Comparación entre metales pesados detectados en los lixiviados al final del ensayo y el Decreto Nacional 1594 de 1984, Artículo 40

ERA	CROMO TOTAL Lixiviado sin norma	COBRE Lixiviado mg/l lím máx: 0.2	PLOMO Lixiviado mg/l lím máx: 5.0	CINC Lixiviado mg/l Lím. máx: 2.0	NIQUEL Lixiviado mg/l lím máx: 0.2
1 (100s)	0,12	0,01	0,17	0,26	0,43
2 (20b:80s)	0,002	0,01	0,10	0,28	0,83
3 (30b: 70s)	0,002	0,01	0,14	0,07	0,40
4 (40b: 60s)	0,002	0,01	0,25	0,66	0,53
5 (50b: 50s)	0,05	0,01	0,12	0,34	0,73
6 (100b)	0,10	0,01	0,05	0,11	0,73

### 2.1.3 Desarrollo de los bioindicadores

Se les hizo seguimiento a los bioindicadores *Brachiaria decumbens* y *Raphanus sativus* en su porcentaje de germinación, altura de crecimiento, análisis bromatológico y contenido de metales pesados; se encontró que los máximos porcentajes de germinación fueron para la *Brachiaria* de 50% en las eras 3 y 4 y para el *Raphanus* 75% en las eras 2 y 3. Se observó especialmente un bajo porcentaje de germinación (inferior al 35%) en las eras 5 y 6, dada la dificultad de brote por parte de las semillas ante la formación de una fuerte costra superficial.

Las mejores respuestas en altura y vigorosidad de plantas se presentaron en las eras 2, 3 y 6, considerando que esta última fue la de menor porcentaje de germinación. En las fotografías 5 y 6 se ilustra el material representativo cosechado en cada era.

Fotografía 5. Crecimiento de la *Brachiaria decumbens*Fotografía 6. Crecimiento del *Raphanus sativus*



En cuanto a la acumulación de metales pesados por parte de los bioindicadores, se halló un incremento en los niveles de cromo y cinc en la *Brachiaria* y de cobre en el *Raphanus* en compara-

ción con individuos de la misma especie encontrados comercialmente. En las tablas 10 y 11 se muestran los resultados del análisis bromatológico y de metales pesados.

**Tabla 10.** Análisis bromatológico realizado a los bioindicadores cosechados en las eras

CRITERIO	ERA 1 (100s)	ERA 2 (20b:80s)	ERA 3 (30b:70s)	ERA 4 (40b:60s)	ERA 5 (50b:50s)	ERA 6 (100b)
Ceniza %	21,00	12,63	13,50	14,90	12,70	10,60
Proteína Bruta %	6,52	23,22	21,27	22,00	25,92	27,80
Fibra Cruda %	24,00	24,00	25,29	27,40	26,40	25,60
Fósforo %	0,02	0,28	0,27	0,33	0,38	0,41
Calcio %	0,39	0,45	0,69	0,64	0,66	0,67
Magnesio %	0,23	0,56	0,57	0,56	0,71	0,71

Fuente: Laboratorio de Bromatología, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Julio 2001

**Tabla 11.** Metales pesados reportados en los bioindicadores cultivados frente al análisis de individuos de igual especie encontrados en el comercio

ERAS		ERA 1 (100s)	ERA 2 (20b:80s)	ERA 3 (30b: 70s)	ERA 4 (40b: 60s)	ERA 5 (50b: 50s)	ERA 6 (100b)	Especie comercial
Cromo	Rábano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41	ND
	Brachiaria	1.57	1.75	16.72	34.99	49.28	65.82	ND
Niquel	Rábano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ND
	Brachiaria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.24
Cobre	Rábano	0.24	0.99	1.21	2.40	2.77	3.06	ND
	Brachiaria	1.26	3.30	4.14	6.50	7.12	11.21	9.06
Plomo	Rábano	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ND
	Brachiaria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	ND
Cinc	Rábano	35.83	80.35	92.15	106.47	111.41	144.99	168.15
	Brachiaria	79.68	42.40	50.40	80.33	90.16	131.60	43.51

Fuente: Laboratorio del Grupo de Investigaciones Ambientales de la UPB.

## 2.2 PRUEBA 2: COMPOSTAJE DEL BIOSÓLIDO

El compostaje es un proceso mediante el cual un biosólido digerido se somete a un proceso de degradación del material orgánico y se obtiene simultáneamente una reducción del contenido de microorganismos patógenos. El producto final es similar a un humus con olor a musgo, color café oscuro, una baja relación carbono/nitrógeno y una naturaleza continuamente cambiante dada la acción de los microorganismos presentes en él; adicionalmente, presenta una alta capacidad de intercambio catiónico, absorción de agua y textura variable dependiendo del proceso de tamizado al que haya sido sometido.

La técnica de compostaje utilizada en el ensayo fue la de pilas en hileras con volteo manual para su ventilación. Las pilas se formaron con mezclas previamente establecidas en el laboratorio como las óptimas para obtener diferentes relaciones finales de C/N; las dimensiones por cada pila fueron de 1,2 m de ancho por 10 m de largo y una altura de 1,2 m con una frecuencia de volteo según la evolución de la prueba inicial de laboratorio. De cada porcentaje de mezcla se realizaron tres réplicas.

### 2.2.1 Ensayos preliminares en laboratorio

Con el fin de tener un seguimiento cualitativo de la evolución del proceso de compostaje del biosólido, en el laboratorio se realizaron ensayos preliminares con aserrín en tres tamaños de partícula y hojas de podas de árboles. Este seguimiento se realizó por 15 días y se utilizaron muestras de 2,5 kg en diferentes proporciones de mezcla biosólido/material de soporte. Para la aireación se hicieron volteos de forma manual con una frecuencia diaria.

El material de soporte aportó carbono orgánico de modo que se pudo garantizar un buen proceso de compostaje. Asimismo, dadas las características de humedad, plasticidad y contenido de microorganismos del biosólido, se necesitó facilitar la absorción

de humedad, la homogeneización y proveer de estructura porosa a la mezcla para facilitar la aireación.

Durante el seguimiento cualitativo se observaron los cambios en textura, color, generación de olores, evolución de microorganismos, formación de lixiviados y la calidad del producto final. Con esta información se seleccionaron para los ensayos a escala de laboratorio (segunda etapa de la prueba de compostaje), el aserrín de tamaño medio, que proporcionó el mayor contenido de materia orgánica a la mezcla y el menor tiempo de compostaje; y las mezclas en la relación 50% aserrín de tamaño medio y 50% de biosólido, ya que presentó la condición de mayor homogeneidad.

### 2.2.2 Ensayos a escala de laboratorio

Luego de realizar los ensayos preliminares, se plantearon los ensayos a escala de laboratorio utilizando como material de soporte aserrín en tamaño de partícula medio y equinaza como nuevo material para ensayar, dado su mayor aporte de materia orgánica, tamaño de partícula y aporte en variedad de población bacteriana, que puede mejorar la actividad microbiana durante la descomposición de la materia orgánica.

En el seguimiento del proceso se realizaron tres mezclas: 50% aserrín con 50% biosólido, 30% aserrín con 70% biosólido y 30% equinaza con 70% biosólido; fue esta última la mezcla de mejor evolución en lo concerniente a disminución de olores, homogeneidad, desagregación del material, porosidad, humedad y población activa de microorganismos.

Con base en esta información se desarrollaron los ensayos a escala piloto (tercera etapa de la prueba de compostaje) donde se mezclaron biosólido, aserrín y equinaza en las proporciones estudiadas.

### 2.2.3 Ensayo a escala piloto

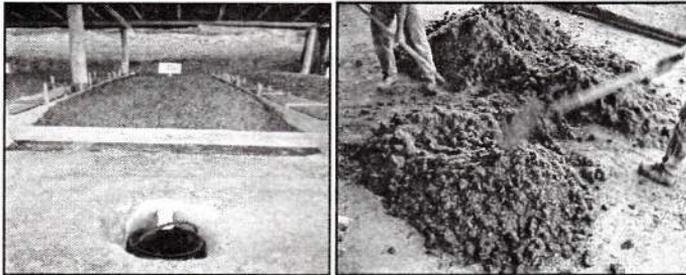
En esta prueba se determinaron las mezclas para el ensayo a escala industrial, donde se evaluó la calidad del producto final y su potencial aplicación como mejorador de suelos.



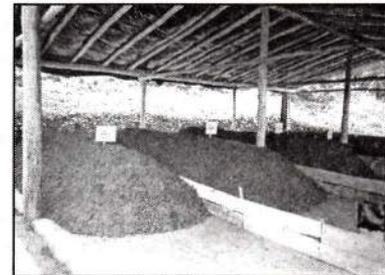
Las zonas de trabajo se construyeron con pendiente del 2% hacia el centro y del 1% longitudinal, y se colocó en el extremo un tramo de tubería de PVC de 2 pulgadas para conducir los lixiviados hacia recipientes de almacenamiento; de igual modo, el área ocupada por las pilas de compostaje se protegió con una cubierta superficial

como de invernadero. La mezcla de los materiales se hizo en forma manual, debido a la dificultad de la homogeneización dadas las características plásticas y humedad del biosólido.

En las fotografías 7, 8 y 9 se ilustra el proceso de mezcla y el sitio de compostaje.



Fotografías 7 y 8 Formación de las pilas y mezcla de los materiales



Fotografía 9 Pilas de compost al final del proceso

Se formaron tres pilas distribuidas paralelamente a lo largo del área de trabajo. Las proporciones de mezcla para cada una de ellas fue la siguiente:

Pila 1: 50% biosólido : 50% equinaza (50B/50E)

Pila 2: 60% biosólido : 40% equinaza (60B/40E)

Pila 3: 60% biosólido : 30% equinaza : 10% aserrín (60B/30E/10A)

Para el análisis del proceso se realizó una inspección visual al comienzo y al final del ensayo, el cual permitió verificar cambios en condiciones organolépticas y de aspecto del material. En las tablas 12 y 13 se establecen los cambios observados en el material.

**Tabla 12.** Inspección visual fase inicial de compostaje

INDICADOR	DESCRIPCIÓN
Olor	Durante los primeros dos volteos manuales (2 semanas de proceso) se percibe olor a amoníaco, dada la volatilización del nitrógeno.
Color	Las tres pilas presentan color similar, variando entre gris oscuro y amarillo, donde se distinguen los materiales.
Humedad	Las pilas 1 y 2 se observan con más humedad que la pila 3. Es de esperarse, puesto que el aserrín tiene muy bajo contenido de humedad al principio. Sin embargo, en las tres pilas se logra humedad adecuada para iniciar el proceso.
Aspecto	En la mezcla inicial se observan grumos o terrones de biosólido con la equinaza impregnada; se distinguen los materiales de mezcla en toda la masa. Con el tiempo se espera que los grumos empiecen a desagregarse por los volteos y oxidación de la materia orgánica. La presencia de estos grumos tiene como ventaja facilitar la aireación natural. Hay presencia de insectos como moscas, una característica de evolución en procesos de descomposición de la materia orgánica.
Lixiviados	En el sitio de almacenamiento de biosólidos no se presenta generación de lixiviados. En las pilas recién formadas no se observa exceso de humedad que dé lugar a la generación de lixiviados.
Temperatura	La temperatura inicial en las pilas está ligeramente por encima de la temperatura ambiente; se espera que empiece el incremento con el tiempo.

**Tabla 13.** Inspección visual fase final del compostaje

INDICADOR	DESCRIPCION
Olor	No se perciben olores en el área de trabajo, debido a las buenas condiciones de humedad y aireación de las pilas.
Color	Las tres pilas presentan color café marrón, característico de un material humificado.
Humedad	Se observa sequedad en la parte superficial (2 cm), lo que es normal por el contacto con el aire. Dentro de las pilas no se observan zonas secas ni condiciones anaerobias que desfavorezcan el proceso. No se requiere humectación.
Aspecto	Se observa un material suelto, homogéneo, aunque se aprecian aún pequeños grumos. Los materiales se encuentran bien incorporados en la masa de compost. Se observa reducción en el volumen del material comparado con el inicial. Hay reducción en la presencia de insectos. Se observan hongos blancos en el material (actinomicetes), evidencia de un buen material compostado.
Lixiviados	No se generaron.
Temperatura	Las tres pilas presentan temperatura estabilizada alrededor de la temperatura ambiente, fase mesofílica.

#### 2.2.4 Variables de seguimiento del proceso de compostaje

Durante el tiempo de obtención del producto maduro se realizó la aireación mediante la técnica de volteo manual, una vez por semana en todas las pilas. En la tabla 14 se presentan los indicadores medidos durante el proceso de compostaje del biosólido en las diferentes mezclas.

**Tabla 14.** Análisis fisicoquímicos de las pilas de compostaje

INDICADOR	PILA 1 50B / 50E		PILA 2 60B / 40E		PILA 3 60B / 30E / 10A	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
% humedad	64,36	51,62	65,54	54,26	62,03	52,67
pH	7,34	6,31	8,01	6,27	8,11	6,46
Conductividad mS/cm	1,57	3,59	1,78	2,96	1,75	2,68
% Cenizas	44,12	50,31	53,74	49,13	46,40	47,24
% Sólidos volátiles	55,88	49,69	46,26	50,87	53,60	52,76
% Nitrógeno total	1,85	1,79	2,00	1,62	2,08	1,98
% Carbono orgánico	19,37	15,92	18,09	14,31	21,80	18,67
Relación C/N	10,49	8,91	9,03	8,85	10,48	9,44
Fósforo (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,90	3,19	2,72	2,39	2,04	1,97
Relación C/P	4,97	5,00	6,65	6,00	10,67	9,47
Potasio (% K <sub>2</sub> O)	0,75	0,84	0,81	0,72	0,72	0,61
Relación C/K	25,76	19,04	22,39	19,77	30,12	15,56
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,23	0,44	0,22	0,41	0,22	0,37
Capacidad de retención de agua (mL/g) malla 10	1,49	1,53	1,39	1,44	1,70	1,31

Análisis efectuados por el Grupo de Investigación en Energía Molecular –GIEM– de la U. de A.



### 2.2.4.1 Temperatura

En las tres pilas se observó claramente el comportamiento esperado para un proceso de compostaje en el que la temperatura se incrementa hasta alcanzar un valor máximo entre 50 y 55°C por espacio máximo de 48 horas y, por último, un descenso hasta lograr temperaturas similares a la del ambiente, como lo muestra la línea de tendencia en el gráfico 1.

Los descensos o puntos de inflexión que se observan en las curvas de temperatura significan el cambio de temperatura por efectos de la aireación; las temperaturas se recuperan rápidamente debido a la actividad bacteriana en condiciones aerobias. Durante el tiempo de compostaje, fue necesario realizar una leve humectación por aspersión en la capa superficial, durante la quinta semana de compostaje. A partir de esta semana, se observa una disminución considerable de la temperatura hasta estabilizarse y llegar a valores similares a la ambiental, lo que indica una actividad biológica lenta y una disminución de la materia orgánica.

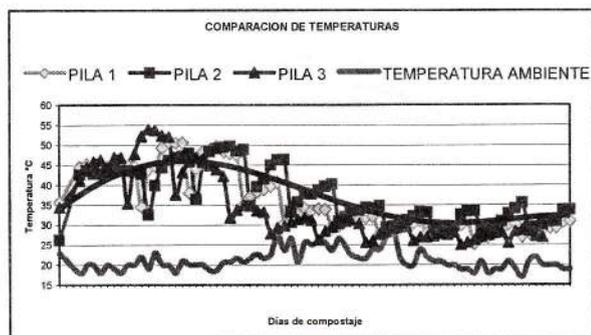


Gráfico 1. Comparación de las temperaturas en las pilas 1, 2 y 3 durante el proceso de compostaje

### 2.2.4.2 Seguimiento microbiológico

Al comienzo del proceso se presentó un crecimiento de microorganismos mesófilos, cuya población disminuyó al aumentar gradualmente la temperatura, momento en el cual se inició una colonización de microorganismos termófilos, que son suma-

mente activos y provocaron una intensa y rápida degradación de la materia orgánica y mayor elevación de la temperatura, lo que originó una disminución en los microorganismos patógenos. En los gráficos 2, 3 y 4 se presenta el seguimiento del crecimiento microbiano en las tres pilas de compostaje.

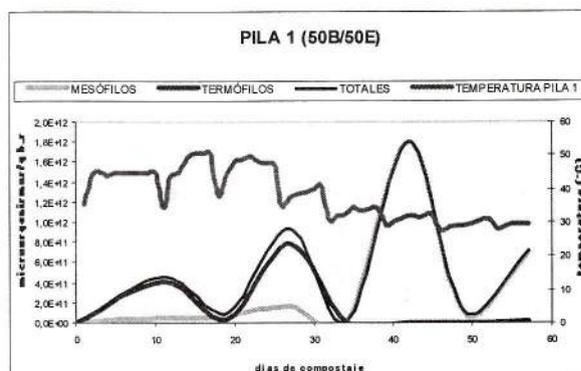


Gráfico 2. Seguimiento microbiológico de la pila 1

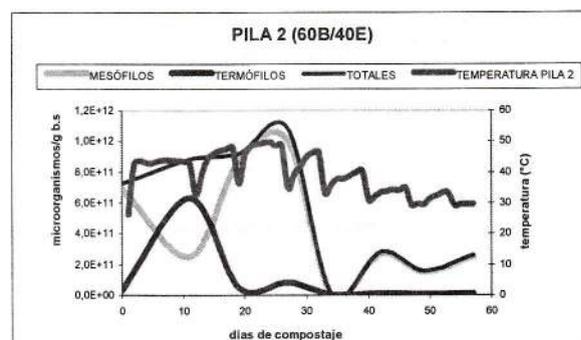


Gráfico 3. Seguimiento microbiológico de la pila 2

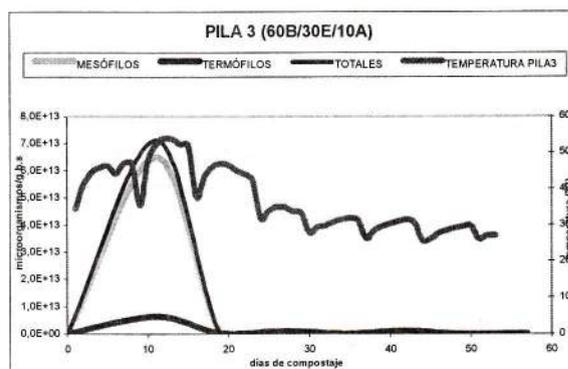


Gráfico 4. Seguimiento microbiológico de la pila 3

### 2.2.4.3 Porcentaje de humedad

En cada una de las mezclas se partió de un porcentaje de humedad entre el 40 y 65%, considerado por Rynk, 1992, como la humedad óptima para iniciar el compostaje, y durante el proceso se observó una ligera disminución del contenido de agua por la aireación sin llegarse a secado completo. El hecho de no requerirse humectación permanente en las pilas muestra una relación óptima del binomio humedad-aireación. La evolución del proceso en este rango de humedad garantizó que la actividad microbiana se desarrollara adecuadamente. La frecuencia de aireación fue eficiente, ya que no se originaron condiciones anaerobias dentro de las pilas ni malos olores. En el gráfico 5 se muestra el porcentaje de humedad a lo largo de la prueba.

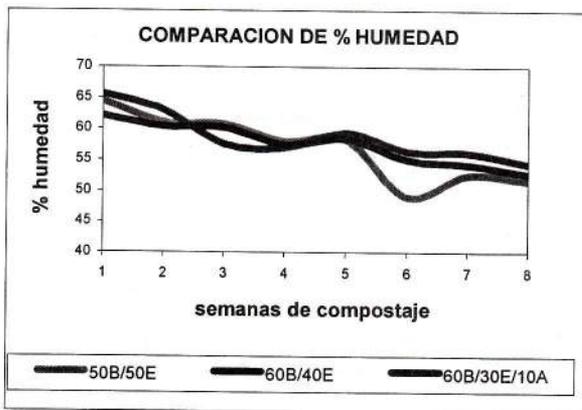


Gráfico 5. Porcentaje de humedad

### 2.2.4.4 Comportamiento del pH

Durante todo el proceso se observó un descenso del pH, como resultado de la presencia de ácidos orgánicos y  $\text{CO}_2$  generados por el metabolismo bacteriano y la liberación de amonio por volatilización de nitrógeno, lo cual es de esperar en un producto de compostaje. Lo anterior se muestra en el gráfico 6.

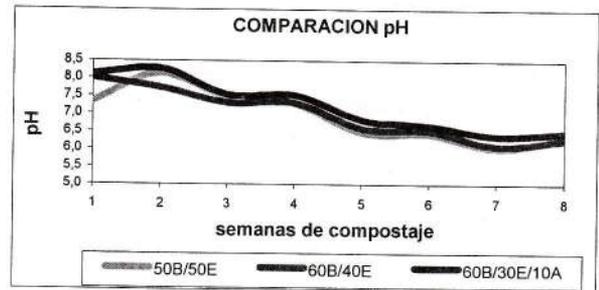


Gráfico 6. Variación del pH

### 2.2.4.5 Conductividad eléctrica

La tendencia de la conductividad en todas las pilas es la de aumentar en el tiempo, debido a que en el proceso de degradación de la materia orgánica hay liberación de moléculas orgánicas de bajo peso, que normalmente están cargadas, como el ácido acético, propiónico y butírico. Este comportamiento está de acuerdo con lo esperado en un proceso de compostaje en el que la conductividad eléctrica se incrementa y evidencia la mineralización de la materia orgánica.

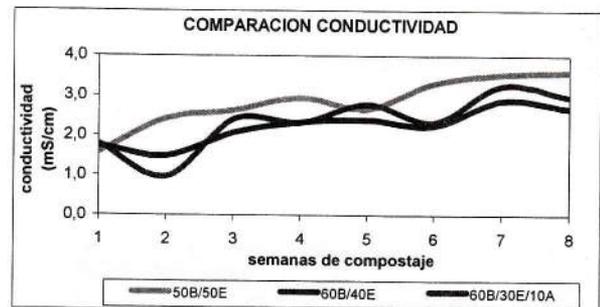
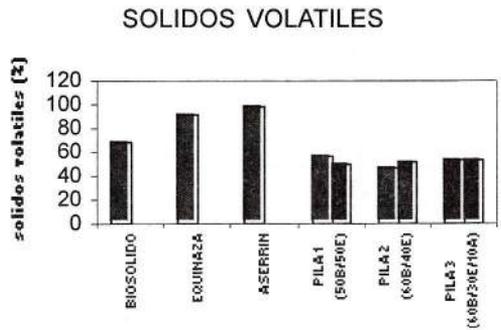


Gráfico 7. Variación de la conductividad

### 2.2.4.6 Sólidos volátiles

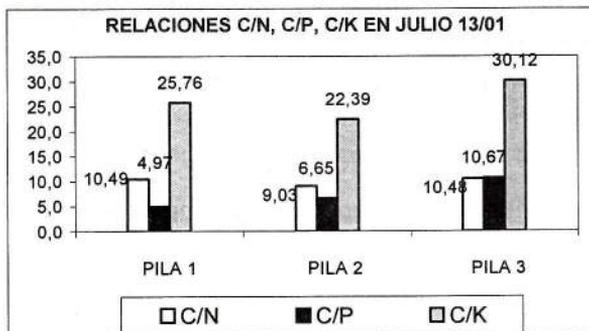
Como resultado de la mineralización de la materia orgánica presente en las materias primas, se dio una reducción del contenido de sólidos volátiles, así las mezclas al final del ensayo presentaron unos valores menores que las materias primas al comienzo de la prueba. Lo anterior se observa en el gráfico 8.



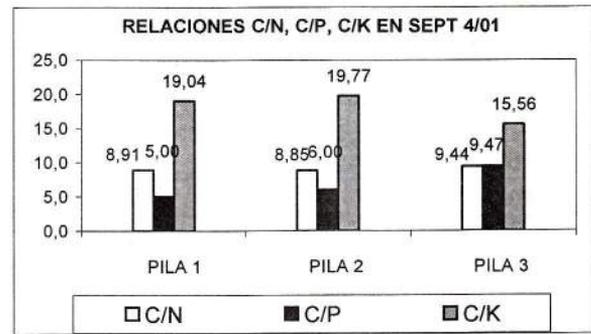
**Gráfico 8.** Comportamiento de los sólidos volátiles al comienzo y al final del proceso

#### 2.2.4.7 Relaciones entre nutrientes

Las mezclas iniciales presentaron relaciones C/N cercanas a 10, dicho valor es muy bajo de acuerdo con los rangos dados en la literatura como base para un material inicial de compostaje (C/N 25-30); sin embargo, se observó que los mecanismos biológicos de transformación del carbono y el nitrógeno compensó unos con otros y las pérdidas fueron relativamente bajas, por lo que al final del proceso esta relación disminuyó levemente por volatilización, como lo muestra la generación de olores amoniacales. En los gráficos 9 y 10 se presentan las relaciones de carbono, fósforo y potasio en las pilas al principio y al fin de la prueba.



**Gráfico 9.** Relaciones C/N, C/P y C/K al comienzo del proceso



**Gráfico 10.** Relaciones C/N, C/P y C/K al final del proceso

#### 2.2.4.8 Fitotoxicidad

Para verificar la aprovechabilidad del material se realizó una prueba de fitotoxicidad basada en la germinación de *Raphanus sativus* como bioindicador. En esta prueba se observó que el porcentaje de germinación obtenido en las tres pilas está por encima del 80%, valor acorde con lo estipulado en la norma Icontec\*: el crecimiento de las raíces y plántulas se da en forma ascendente, lo cual evidencia la ausencia de elementos fitotóxicos, la aparición de procesos de mineralización de la materia orgánica y el resultado de un producto final con buen grado de madurez. En la tabla 15 se presentan los resultados de la prueba de fitotoxicidad.

\* Fitotoxicidad. Un compost no podrá poseer una fracción hidrosoluble (1:10 p/v) con menos de un 80% de germinación en 24 horas del modelo *Raphanus sativus*.

**Tabla 15** Análisis de fitotoxicidad en las pilas de compostaje

Tratamiento	% germinación	Longitud plántulas, cm.	Longitud raíces, cm.
Análisis de Fitotoxicidad – Julio 2001 (comienzo)			
Control en <i>Raphanus sativus</i>	100	1,00	2,30
50B / 50E	100	1,20	2,70
60B / 40E	90	1,10	2,50
60B / 30E/ 10A	90	1,10	2,50
Análisis de Fitotoxicidad – Septiembre 2001 (final)			
Control	100	1,30	3,60
50B / 50E	95	1,20	3,40
60B / 40E	95	2,70	3,90
60B / 30E/ 10A	90	2,10	3,80

Ensayos realizados por el Grupo de Investigación en Energía Molecular –GIEM– de la U. de A.

### 3. CONCLUSIONES

Ante la ausencia de normas colombianas que orienten sobre el uso y la disposición de los biosólidos, se adoptaron los criterios establecidos por la EPA. Dado lo anterior y bajo el estándar 40 CFR 503 para la clasificación de los biosólidos y a partir de las pruebas de TCLP y CRETIB, se establece que el biosólido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando puede clasificarse como un residuo Clase PC, Tipo B y como un residuo No Peligroso.

#### Disposición superficial de biosólidos en suelos

Con los criterios de la EPA podemos concluir que para un suelo degradado con características similares al del estudio, como ubicación en el trópico, bajo potencial de producción y pobre en contenido de nutrientes, los biosólidos que provienen de una PTAR combinada como la de San Fernando (Itagüí, Antioquia), permiten aportar cantidades de materia orgánica y nutrientes que potencian su productividad. No obstante, la presencia de metales pesados y de organismos patógenos en el biosólido hacen de éste un material que presenta riesgos al ser aplicado en zonas de cultivos agrícolas para consumo humano y animal, dada su posible acumulación tanto en los suelos como en las aguas percoladas y en las especies vegetales.

Teniendo en cuenta los análisis realizados, se puede establecer que para las condiciones del ensayo, las eras 2 y 3 presentaron una respuesta favorable para la mayoría de los indicadores medidos, de ahí que sean los porcentajes de mezcla propuestos para aplicaciones únicas en revegetalizaciones con cultivos no comestibles aplicadas a suelos degradados, tomando como referencia espesores de 0,40 m y pendientes no mayores del 2%. Las tasas de aplicación calculadas para el ensayo se muestran en la tabla 16; sin embargo, debe precisarse que los cálculos para uso posterior deben hacerse con base en la geoquímica de los suelos donde se realizará la aplicación, los factores climáticos, la pendiente y ubicación de las zonas, los requerimientos de nutrientes de las especies empleadas para la revegetalización, así como las tasas máximas acumulativas de metales pesados.

**Tabla 16.** Tasas de aplicación óptimas encontradas en el ensayo

Porcentaje de mezcla	Tasa en base seca
20% biosólido : 80% suelo	214,14 t/ha
30% biosólido : 70% suelo	347,52 t/ha

#### Compostaje de biosólidos

El comportamiento de las condiciones evaluadas, como temperatura, humedad, aireación y las sucesiones microbianas que se dan en las diferentes fases del proceso, muestran que el compostaje de



biosólidos es una opción efectiva para reducir y eliminar los niveles de patógenos e insectos; de esta forma, en su aplicación como enmienda al suelo puede prevenir la contaminación de terrenos y fuentes de agua.

Aunque el compost obtenido es de buena calidad en cuanto a criterios físicos, químicos y microbiológicos, en el contenido de metales pesados presenta contenidos de cromo total por encima de los valores estipulados por la normatividad colombiana en el Decreto 822 de 1998 RAS 2000 para compost utilizado en cultivos; sin embargo, esto no indica que el biosólido no pueda ser usado en forma compostada como recuperador de suelos degradados, pues este producto tiene gran potencial en la recuperación de zonas de minería, áreas forestales y jardines, con restricción en la frecuencia de aplicación y en zonas de cultivo.

Uno de los aportes de mayor interés en el desarrollo de este estudio fue la estandarización de métodos de análisis estipulados por la EPA 40 CFR para la caracterización de biosólidos en variables fisicoquímicas y microbiológicas, peligrosidad y toxicidad, así como la adaptación de tecnología para la construcción de equipos que permitieran realizar el ensayo de lixiviación conocido como Toxic Characteristic Leaching Procedure TCLP, para lo que se diseñaron y construyeron dos equipos, el aparato de filtración a presión y el aparato de agitación rotatorio.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITARIA Y AMBIENTAL. Manual práctico para compostaje de biosólidos. Río de Janeiro : Universidad Estatal de Londrina, 1999. 83p.
- CASANOVA O., Eduardo S. Introducción a la ciencia del suelo. Caracas : Universidad Central de Venezuela, 1991. 395p.
- BOHN, Heinrich L., et al. Química del suelo. México : Limusa Noriega, 1993. 370p.
- COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE AGRICULTURA. LEÓN T., Fernando y OSPINA O., Luis A. El pasto *Brachiaria decumbens*, Stapf. s.p.i.
- DONÉZAR DÍEZ, Miguel. Estudios de suelos y evaluación de tierras. En: Contaminación y Depuración de Suelos. Madrid : Instituto Geominero de España, 1995. 33p.
- EPSTEIN, Eliot. Land application of sewage sludge and biosolids. Florida-USA. : CRC Press LLC. 2003. 201p.
- ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Office of Water Regulation and Standards. Landfilling of sewage sludge. Chicago, Illinois. (1998); s.p.
- \_\_\_\_\_. Land application of sewage sludge. A guide for land appliers on the requeriments of the federal standards for the use or the disposal of sewage sludge. 40 CFR part 503. Washington. (Dic. 1994); s.p.
- \_\_\_\_\_. An analysis of composting as an environmental remediation technology. Chicago, Illinois. (April 1998); p. 1-114.
- \_\_\_\_\_. Land application of sewage sludge and domestic septage. Process Design Manual. Cincinnati. (Sep. 1995); s.p.
- \_\_\_\_\_. Sampling procedures and protocols for the national sewage sludge survey. Washington, D.C. (1989); s.p.
- \_\_\_\_\_. Biosolids generation, use and disposal in the United States. Washington. (Sep. 1999); p. 1-74.
- GARCÍA O. Álvaro. Efectos tóxicos de los micronutrientes y de otros elementos. En: Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. Bogotá : Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1998. 30p.
- GOLDSTEIN, Nora; GLENN, Jim and MADTES, Celeste. National overview : biosolids management update. En: BioCycle. s.l. (Ene. 1998); p. 73.
- GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS MOLECULARES, GIEM. Producción de compost en la industria avícola. Medellín : Facultad de Ciencias Exactas, Universidad de Antioquia, 2000. 32p.
- HONORATO P., Ricardo. Manual de edafología. 4ª ed. México : Alfaomega, 2000. 267p.
- KABATA P., Alina y PENDIAS, Henryk. Trace elements in soils and plants. 2a ed. Florida: CRC Press, 1999. 225p.

- LÓPEZ R., Julio y LÓPEZ M., Julio. El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. 4 ed. Madrid : Ediciones Mundiprensa, 1985. 363p.
- LUEJE C., Miguel A. y GÓMEZ L., Alberto. Optimización energética a partir de los fangos generados en la estación depuradora de aguas residuales de Galindo (SESTAO). En: Fundación Babcock para la Innovación Tecnológica, Cuadernos para la Innovación Tecnológica 11. s.l. (1995); s.p.
- MEJÍA, Leonidas. Utilidad e importancia del análisis químico total en el estudio de la génesis, composición y contaminación de los suelos. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Bogotá : Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1990. 89p.
- MONTENEGRO G., Hugo. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Bogotá : Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2000. 137p.
- PEREZ, José. et al. El tratamiento de lodos. En : ACODAL. Medellín. (Dic. 1998); p. 25-30.
- RESOLUCIÓN 1096 del 17 de noviembre de 2000. Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Título F. Bogotá : Ministerio de Desarrollo Económico, 2000. 1000p.
- REDONDO, M., et. al. Aplicación de biosólidos como fertilizante orgánico. En: Ingeniería Química. Madrid. (Jun., 1998); p. 181-185.
- SASTRE C., Isabel. Influencia de distintos tipos de impacto ambiental en la ecología microbiana de suelos de la comunidad de Madrid. Madrid : Universidad Autónoma de Madrid, 1999. 386p.
- SHIRALIPOUR, Aziz; FABER, Ben and CHROWSTOWSKI, Marshall. Green broccolo and lettuce growth using composted biosolids. En: Compost Science & Utilization. s.l. Vol. 4, (Jun. 1996); p. 38-42.
- SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. COMITÉ REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Actualidad y futuro de los micronutrientes en la agricultura. Bogotá : Prolabo, 1998. 187p.
- SUÁREZ V, Senén y FRANCO A, Carlos. Orientaciones sobre prácticas de manejo de *Brachiaria decumbens* en suelo de ladera. En: Avances Técnicos Cenicafé. Manizales. No. 128, (Dic. 1985); s.p.
- SZTERN, Daniel y PRAVIA, Miguel. Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos. OPS/HEP/HES/URU/02.99. Uruguay : OPS, 1999. 69p.
- ZAMBRANO G., Jairo. Abonos orgánicos. Santiago de Cali: Universidad Nacional de Colombia, 2000. 107p.