

VARIACIÓN DE DIFERENTES PARÁMETROS DE HUMIFICACIÓN DURANTE DOS TIPOS DE COMPOSTAJE CON RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE ROSAS

Diana María Fariás Camero, María Inés Ballesteros G¹, Myriam Bendeck L.

Aceptado: Septiembre/2000

Keywords: composting, humification parameters, humic acids characterization, organic matter.

RESUMEN

Se llevaron a cabo dos procesos de compostaje a partir de residuos lignocelulósicos de rosas durante 165 días aproximadamente. En uno de los procesos la descomposición del material fue realizada sólo por microorganismos (compostaje directo) y en el otro fuera de los microorganismos se adicionaron lombrices de tierra *Eisenia foetida* (compostaje indirecto). Se tomaron muestras periódicas en diferentes lugares de las pilas y se midió semanalmente la temperatura. En cada una de las muestras se determinó el contenido de carbono total orgánico, se extrajo y fraccionó la materia orgánica con una mezcla de NaOH 1M y pirofosfato de sodio 1M. En las fracciones separadas, extracto húmico, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas se cuantificó el contenido de carbono total orgánico; con estos resultados se calcularon diferentes parámetros de humificación como la relación de humificación, el índice de humificación, la razón de polimeriza-

ción, el porcentaje de ácidos húmicos y la relación de carbono orgánico no extraído sobre carbono extractable con mezcla alcalina.

En los ácidos húmicos se determinó la variación de la relación E_4/E_6 , el contenido de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y carbono y las relaciones C/H, C/O y C/N.

La variación de los parámetros en cada uno de los procesos permitió analizar la dinámica de la transformación y formación de las diferentes sustancias húmicas, encontrándose que la acción de las lombrices no acelera el proceso de humificación y que éste está limitado por el sistema de compostaje y por la temperatura que en él se genere y mantenga.

Se estableció que el porcentaje de carbono extractable y la relación C_{NoExt}/C_{Ext} no pueden ser considerados como satisfactorios para la evaluación del grado de estabilización del compost, y que la razón de polimerización y el índice de humificación son los parámetros más adecuados para determinar el grado de humificación del material.

¹ Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, A. A. 14490, Bogotá, Colombia.

ABSTRACT

Two composting processes were carried out; they lasted for about 165 days. In one of the processes the decomposition of the material was performed only by microorganisms only (direct composting) and in the other one, by microorganisms and earthworms -*Eisenia foetida*- (indirect composting). Periodical samples were taken from different places of the pile and a temperature control was made weekly. Organic total carbon was analyzed in each sample, an organic matter extraction and fractionation was carried out with a mixture 1 M sodium hydroxide and 1M sodium pyrophosphate in each sample too. Organic total carbon was quantified in the separated fractions, humic extract, humic acids, fulvic acids and humines; different humification parameters were calculated as of those results: Humification ratio, humification index, polymerization ratio, percentage of humic acids and no extractable organic carbon - extractable carbon ratio.

E_4/E_6 ratio, oxygen, hydrogen, nitrogen and carbon content, C/H, C/O and C/N ratios were analyzed on humic acids.

Humification parameters variation allow us to analyze the humic substances transformation and formation dynamics are limited by composting system and temperature generated and maintained. It was established that extractable carbon percent and CNoExt/Cext ratio cannot be considered as satisfactory parameters in order to evaluate the stabilization compost degree; polymerization ratio and humification index are the most adequate parameters to determinate the material humification degree.

INTRODUCCIÓN

El sistema suelo-planta hace parte del ciclo del carbono. Cuando las plantas y animales muertos se descomponen en el suelo, parte del carbono es recirculado a la atmósfera como CO_2 , el resto es consumido por los microorganismos o es convertido en humus estable (1).

Los compuestos resultantes de la descomposición de la materia orgánica forman el humus, que está constituido por sustancias no humificadas y sustancias húmicas. Las primeras son los compuestos orgánicos con química bien conocida como aminoácidos, carbohidratos y lípidos. Las sustancias húmicas, que representan la fracción más estable del humus, constan de una serie de polielectrolitos altamente ácidos, coloreados del amarillo al negro y de alto peso molecular. Estas sustancias se forman en reacciones secundarias de síntesis y tienen propiedades diferentes a las de los biopolímeros de organismos vivos (como la lignina de las plantas superiores). Las sustancias húmicas son recuperadas generalmente del suelo mediante extracción con álcali, usualmente NaOH 0,1-0,5 N, aunque actualmente se usan reactivos suaves como pirofosfato de sodio. Con base en sus características de solubilidad se pueden separar las siguientes fracciones (2):

- Ácidos húmicos: solubles en álcali, insolubles en ácido.

- Ácidos fúlvicos: solubles en álcali, solubles en ácido, tienen color amarillo a bajo pH, que se torna vino tinto cuando se alcanzan pH altos, pasando por un color naranja cerca a pH 3.0.

- Ácidos himatomelánicos: solubles en álcali, insolubles en ácido y solubles en alcohol, y

- Huminas: insolubles en álcali, pueden consistir de una mezcla de ácidos húmicos enlazados tan íntimamente que no pueden ser separados, o de material húmico altamente condensado con un elevado contenido de carbono, generalmente mayor a 60%.

Entre los parámetros que se han medido para seguir el avance del proceso de humificación en compost se encuentra la cuantificación del contenido de carbono orgánico del extracto húmico, determinación en la que se debe prestar especial atención a la solución extractora, el tiempo de extracción, la relación muestra:extractante y la temperatura (3, 4). Del extracto húmico obtenido se separan usualmente los ácidos húmicos, los ácidos fúlvicos y las huminas, con lo que se determinan las relaciones carbono de ácidos húmicos sobre carbono de ácidos fúlvicos (C_{AH}/C_{AF}) y carbono no extractable con mezcla alcalina sobre carbono extractable (C_{NoExt}/C_{Ext}). Con el contenido de carbono orgánico de dichas fracciones se han establecido diferentes relaciones de humificación, así:

- Relación de humificación (RH): porcentaje de carbono húmico extraído con respecto al carbono orgánico de la muestra.

$$RH = \frac{C_{ext}}{C_{orgtotal}} \times 100$$

- Índice de humificación (IH): porcentaje de carbono de los ácidos húmicos con respecto al carbono orgánico.

$$IH = \frac{CAH}{C_{orgtotal}} \times 100$$

- Relación de polimerización (RP): carbono de los ácidos húmicos sobre carbono de los ácidos fúlvicos en el extracto húmico.

$$RP = \frac{CAH}{CAF}$$

- Porcentaje de ácidos húmicos (%AH): carbono de los ácidos húmicos sobre el carbono del extracto húmico.

$$\%AH = \frac{CAH}{C_{Ext}} \times 100$$

Los ácidos húmicos han sido la fracción más estudiada; para éstos suele establecerse la relación E_4/E_6 (relación de densidades ópticas a 465 y 665 nm) y la relación C/H, que es una medida del carácter alifático o aromático de los ácidos. Así mismo, mediante análisis de espectroscopía infrarroja, se han identificado bandas características que reducen o incrementan su intensidad con el curso del compostaje (3).

En estudios realizados en nuestro país se aplicó una metodología para la extracción de sustancias húmicas de lombricompuestos obtenidos a partir de bovinaza, desechos de cachaza, pulpa de café y gramá trenza, con y sin adición de cal (4). Otra investigación reporta la obtención de lombricompuesto por la acción de *Eisenia foetida* sobre residuos de cachaza, pulpa de café y bovinaza; en el producto se efectuó la separación de materia orgánica (extracción con álcali) y en el extracto húmico se determinó el contenido de

carbono total orgánico y la fracción de huminas (5).

El presente trabajo pretende contribuir al estudio de procesos de compostación con materiales orgánicos que se adicionan continuamente al suelo, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos: caracterizar mediante parámetros químicos la dinámica de la humificación de compostajes en condiciones aeróbicas, donde el desecho (residuos del cultivo de rosas) es descompuesto tanto por acción microbiana como por la acción de lombrices, y establecer los valores de los parámetros de humificación de los dos productos de compostación obtenidos. Además, caracterizar los ácidos húmicos mediante el análisis elemental (C, H, N, O) y la relación E_4/E_6 .

MATERIALES Y MÉTODOS

Los desechos orgánicos empleados en el proceso de compostaje fueron residuos agroindustriales de la poscosecha y del cultivo de rosas de la finca El Rosal (Agrosas S.A.). Se llevaron a cabo dos procesos de compostaje: uno directo, con acción microbiana solamente y otro indirecto, donde además de la acción microbiana se adicionaron lombrices de tierra. Los dos procesos duraron 23 semanas; los materiales compostados se muestrearon periódicamente y se registró su temperatura. Los detalles de los sistemas de compostación y de los muestreos están presentados en una publicación anterior (6).

En cada una de las muestras se determinó el carbono total orgánico por el método de Walkley-Black, oxidando 0,0100 g de muestra con 5,0 mL de $K_2Cr_2O_7$ 1N y

10,0 mL de H_2SO_4 concentrado, y posterior titulación con sulfato ferroso amónico 0,5 N (7).

La extracción y fraccionamiento de la materia orgánica se hizo de acuerdo con el siguiente procedimiento (8): se colocaron en agitación mecánica durante 24 horas 50,00 g de la muestra seca con 500 mL de mezcla de NaOH 1M y pirofosfato de sodio 1M. Se centrifugó a 6000 r.p.m. por 20 minutos; se separó el sobrenadante (extracto húmico) y al residuo se adicionaron otros 500 mL de solución extractora, dejándose en agitación nuevamente 24 horas, después de las cuales se repitió la separación y se reunieron los sobrenadantes. El residuo (fracción no extraída) se secó a 60°C en baño de María. Al sobrenadante se añadió ácido sulfúrico concentrado gota a gota hasta alcanzar un pH entre 1-2 (precipitación de los ácidos húmicos). Para asegurar una precipitación completa se dejó este extracto en la nevera a 4°C durante la noche. Al día siguiente, se centrifugó a 6000 r.p.m. durante 20 minutos, separando así los ácidos fúlvicos (sobrenadante) y los ácidos húmicos (residuo). Estos últimos se llevaron a un volumen de 100 mL con NaOH 0,1M, se dializaron para remover los iones Na^+ y SO_4^- y finalmente fueron liofilizados.

En las cuatro fracciones separadas se determinó el contenido de carbono total orgánico por el método de Walkley-Black (7). Para esta cuantificación se tomaron las siguientes cantidades de muestra: 1 mL del extracto de ácidos húmicos, 5 mL de ácidos fúlvicos, 2 mL del extracto húmico y 0,1000 g de residuo seco (humina); las alícuotas fueron evaporadas a 40°C antes de la oxidación.

La relación E_4/E_6 se determinó por medición de las absorbancias a 465 nm y 665 nm en un espectrómetro Bausch & Lomb Spectronic 70, en una solución de 300 ppm de ácidos húmicos en NaHCO_3 0,05 N (8). La composición elemental (%C, %H, %N) fue determinada en un analizador Leco CHN-600 (9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El carbono del material orgánico y de las diferentes fracciones extraídas en cada una de las muestras tomadas durante el proceso de compostaje y los diferentes parámetros de humificación aparecen en las tablas 1 y 2, para los procesos directo e indirecto, respectivamente. La extracción de la materia orgánica (extracto húmico) se hizo con una mezcla de pirofosfato de sodio e hidróxido de sodio, y no únicamente con hidróxido de sodio, como lo han realizado algunos investigadores a nivel nacional (10). Esto en razón de que se ha encontrado que al extraer la materia orgánica con NaOH se producen modificaciones estructurales en las sustancias extraídas; al extraer con la mezcla se asegura una extracción selectiva, a la vez que se espera una menor alteración en la estructura de las sustancias extraídas (11).

Los valores del porcentaje de carbono orgánico en el extracto húmico varían muy poco a través del tiempo de compostaje en el proceso directo, no existiendo una diferencia significativa entre el valor del porcentaje en el sustrato (4,95%) y en el producto final (5,04%), debido a que el proceso de formación de los ácidos húmicos y fúlvicos se lleva a cabo lentamente. El mismo comportamiento fue encontrado por Iglesias y Pérez (12) en un com-

postaje directo de residuos urbanos donde el carbono extractable se mantuvo en valores cercanos a 10,5% durante los 165 días del compostaje. Contrariamente, en el compostaje indirecto se registra una tendencia al aumento, encontrándose un porcentaje de carbono orgánico de 4,95% en el sustrato y de 6,09% en el producto final.

En ambos procesos, el porcentaje de carbono orgánico de los ácidos fúlvicos muestra tendencia a disminuir a medida que se desarrolla el compostaje, con una estabilización en el día 127 en el proceso directo y en el día 111 en el indirecto, con valores alrededor de 2,0. El decrecimiento en el carbono de los ácidos fúlvicos se atribuye a la creciente complejidad en la estructura de los ácidos húmicos, los que aumentan progresivamente su carácter aromático. A diferencia de lo encontrado para el carbono orgánico del extracto húmico, el contenido de carbono de los ácidos fúlvicos es muy semejante en los dos procesos, al igual que su dinámica. Iglesias y Pérez (12) también registraron una disminución en el porcentaje de carbono de los ácidos fúlvicos en un compostaje directo, estabilizándose a partir de la novena semana del proceso, con valores alrededor de 3,7%. Sugahara e Inoko (13) encontraron resultados similares en un compostaje con residuos urbanos.

En los dos procesos el porcentaje de carbono orgánico en los ácidos húmicos aumenta conforme avanza el proceso de compostaje, con un incremento mayor en el proceso indirecto, teniéndose al final más carbono, el que hará parte de la estructura de los ácidos húmicos. Estos resultados están relacionados con los encontrados para el carbono de los ácidos

fúlvicos, ya que se ratifica que se está llevando a cabo una progresiva condensación de estructuras que contribuyen a la formación de ácidos húmicos, siendo más notoria en el proceso indirecto. Sugahara e Inoko (13), observaron también un aumento en el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos en compostajes directos de residuos urbanos.

En los dos procesos se aprecia un decrecimiento en el porcentaje de carbono no extraído (C_{NoExt}) con la mezcla alcalina, conforme avanza el tiempo de compostación, mostrando tendencia a la estabilización para ambos procesos alrededor de los días 113 y 111 en los compostajes directo e indirecto, respectivamente, comportamiento que se atribuye al consumo que los microorganismos están haciendo de las fuentes carbonadas. El carbono no extraído tiene un decrecimiento que varía entre 90 y 80% del carbono orgánico total en ambos procesos. No obstante, en el compostaje indirecto se observa un incremento de 25% en esta forma de carbono, que no se aprecia en el compostaje directo, lo que posiblemente se explica por el hecho de que los microorganismos presentes son más productivos en condiciones prolongadas a más alta temperatura, lo que se ve favorecido por el sistema de compostación de pannels. En la literatura no se encontraron resultados de este parámetro ya que generalmente sólo evalúan el carbono en el extracto húmico y el carbono tanto de los ácidos fúlvicos como de los ácidos húmicos.

La relación de humificación aumenta a través del tiempo de compostaje, tendiendo a estabilizarse a partir del día 125 en el proceso indirecto con un valor cercano a 21,5; y en el proceso directo, a partir del

día 113 en valores alrededor de 18,3. En general se registra una variación notoria entre el sustrato y el producto final. Este comportamiento en el proceso directo se debe, no a un aumento del contenido de carbono total que se extrae con la mezcla alcalina, sino a la disminución en el contenido de carbono orgánico total.

Los valores de la relación de humificación de los productos finales de los dos procesos satisfacen el valor mínimo de 7,0 establecido por Rolletto y colaboradores (10) para composts maduros de residuos lignocelulósicos, pero vale la pena anotar aquí que estos valores son incluso mayores en el sustrato inicial, es decir, que se ha trabajado en un rango no comparable con el de estos investigadores, debido a la diferente naturaleza del sustrato empleado en el proceso; luego este parámetro no sería buen estimativo de la madurez del compost. Iglesias y Pérez (12) encontraron un aumento en la relación de humificación, estabilizándose en valores alrededor de 22 en la etapa final de un proceso de compostaje directo con residuos urbanos.

En los dos compostajes estudiados, el índice de humificación (IH) aumentó a través del tiempo sin mostrar tendencia a la estabilización en un valor determinado, notándose los mayores incrementos en las primeras semanas para el proceso indirecto, situación que estaría relacionada con los contenidos más bajos de carbono orgánico total y de carbono en los ácidos húmicos. Al final del compostaje indirecto se alcanza un índice de humificación mayor que en el directo, luego en el compostaje indirecto se logra un mayor grado de humificación.

Tabla 1. Diferentes formas de carbono y algunos parámetros de humificación determinados durante el compostaje directo.

Día	C OrgTot %	C _{Ext} %	C _{AF} %	C _{AH} %	C _{NoExt} %	RH	IH	C _{AH} /C _{AF}	%AH	C _{NoExt} / C _{Ext}
1	38,18	4,95	3,49	1,30	33,75	12,96	3,40	0,37	26,26	6,82
8	35,59	4,67	3,38	1,37	32,91	13,12	3,85	0,40	29,34	7,05
15	34,93	4,76	3,23	1,46	31,6	13,63	4,18	0,45	30,67	6,64
22	33,15	4,94	3,19	1,58	29,86	14,90	4,77	0,50	31,95	6,04
29	32,28	4,72	3,03	1,65	28,03	14,62	5,11	0,54	34,96	5,94
36	31,23	4,98	2,94	1,62	26,79	15,95	5,19	0,55	32,53	5,38
43	30,02	5,03	2,80	1,43	25,15	16,76	4,76	0,51	28,43	5,00
57	29,87	4,97	2,68	1,93	25,02	16,64	6,46	0,72	38,83	5,03
71	29,53	4,82	2,49	2,12	24,53	16,32	7,18	0,85	43,98	5,09
85	29,69	4,89	2,31	2,27	24,19	16,47	7,65	0,98	46,42	4,95
99	28,80	4,98	2,28	2,55	23,9	17,29	8,85	1,12	51,20	4,80
113	27,46	5,02	2,13	2,63	22,44	18,28	9,58	1,23	52,39	4,47
127	27,36	5,00	2,05	2,78	22,18	18,27	10,16	1,36	55,60	4,44
141	27,42	5,03	1,99	2,83	22,32	18,34	10,32	1,42	56,26	4,44
162	27,29	5,04	2,01	3,04	22,09	18,47	11,14	1,51	60,32	4,38

Los valores son el promedio de tres determinaciones

C_{Ext}: Carbono orgánico del extracto húmico

C_{AF}: Carbono orgánico de los ácidos fúlvicos

C_{AH}: Carbono orgánico de los ácidos húmicos

C_{NoExt}: Carbono orgánico no extraído

RH: Relación de humificación

IH: Índice de humificación

C_{AH}/C_{AF}: Razón de polimerización

%AH: Porcentaje de ácidos húmicos

C_{NoExt}/C_{Ext}: Relación carbono orgánico de huminas sobre carbono orgánico del extracto húmico

Tabla 2. Diferentes formas de carbono y algunos parámetros de humificación determinados durante el compostaje indirecto.

Día	C Org tot %	C _{Ext} %	C _{AF} %	C _{AH} %	C _{noExt} %	RH	IH	C _{AH} /C _{AF}	% AH	C _{noExt} /C _{Ext}
1	38,18	4,95	3,49	1,30	33,75	12,96	3,40	0,37	26,26	6,82
6	36,53	4,80	3,21	1,39	32,37	13,14	3,81	0,43	28,96	6,74
13	34,14	4,74	3,16	1,58	30,03	13,88	4,63	0,50	33,33	6,34
20	33,98	5,00	3,02	2,08	28,71	14,71	6,12	0,69	41,60	5,74
27	33,07	5,05	2,93	2,17	28,53	15,27	6,56	0,74	42,97	5,65
34	33,11	5,20	2,88	2,35	27,72	15,71	7,10	0,81	45,19	5,33
41	32,99	5,38	2,83	2,50	27,36	16,31	7,58	0,88	46,47	5,09
55	32,75	5,49	2,60	2,73	27,08	16,76	8,34	1,05	49,73	4,93
69	32,01	5,66	2,62	2,99	26,97	17,68	9,34	1,14	52,83	4,76
83	29,56	5,79	2,51	3,03	24,85	19,59	10,25	1,21	52,33	4,29
97	28,86	6,03	2,38	3,32	23,41	20,89	11,50	1,40	55,05	3,88
111	29,26	6,05	2,11	3,48	23,52	20,68	11,89	1,65	57,52	3,89
125	28,78	6,14	2,03	3,60	22,93	21,33	12,51	1,77	58,63	3,73
139	28,53	6,16	2,09	3,68	22,62	21,59	12,90	1,67	59,74	3,67
160	28,21	6,09	2,02	3,79	22,29	21,59	13,43	1,88	62,23	3,66

Los valores son el promedio de tres determinaciones

C_{Ext}: Carbono orgánico del extracto húmico

C_{AF}: Carbono orgánico de los ácidos fúlvicos

C_{AH}: Carbono orgánico de los ácidos húmicos

C_{noExt}: Carbono orgánico no extraído

RH: Relación de humificación

IH: Índice de humificación

C_{AH}/C_{AF}: Razón de polimerización

%AH: Porcentaje de ácidos húmicos

C_{noExt}/C_{Ext}: Relación carbono orgánico de huminas sobre carbono orgánico del extracto húmico

El incremento general en el índice de humificación señala que, a medida que avanza el proceso, una mayor cantidad del carbono total está haciendo parte de las estructuras de los ácidos húmicos que se están formando. Roletto y colaboradores (10) establecieron un índice mínimo de 3,5 para composts maduros de residuos lignocelulósicos, no obstante, este valor es alcanzado en la primera semana del compostaje llegando hasta valores superiores a 10 en ambos procesos; por tanto, en este caso, no puede ser considerado como parámetro de comparación. Por el contrario, sí se pueden comparar con el mínimo establecido por Iglesias y Pérez (12) para composts de residuos urbanos, en donde se considera como índice de madurez valores superiores a 13,0. El índice de humificación del producto del compostaje indirecto es el que está más cercano a este valor, por tanto sería el que satisface la condición mínima establecida.

La razón de polimerización se incrementó a medida que se desarrolló el proceso de compostaje, alcanzando valores más altos en el compostaje indirecto, sin mostrar tendencia a la estabilización en las últimas semanas. Este aumento indica que se está produciendo un incremento gradual en la tasa de polimerización durante el compostaje, la que se atribuye al incremento tanto del carácter aromático de las sustancias que se están formando, como del tamaño molecular de los polímeros de tipo húmico presentes en el compost (13).

La literatura sugiere que los valores de esta relación no pueden ser menores que 1 ni mayores a 3 (12). Los resultados aquí obtenidos son cercanos al mínimo de 1,6 establecido por Iglesias y Pérez (12). El

valor mínimo establecido por Roletto y colaboradores (10) para composts maduros de residuos lignocelulósicos es de 1,00. Entonces los dos compost obtenidos satisfacen de todos modos este parámetro, aun varias semanas antes de terminar el proceso.

A medida que avanza el proceso el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos, es cada vez mayor en el extracto húmico, comportamiento que se observa en los dos compostajes. El incremento es ligeramente mayor en el compostaje indirecto y además no muestra tendencia alguna a la estabilización durante las etapas del proceso. Una explicación a este comportamiento es la formación de ácidos húmicos ya sea por procesos de neoformación a partir de los residuos de las moléculas que se degradan o a través de las transformaciones que suceden en la lignina. Este parámetro nos muestra en buena forma que el proceso de humificación se está llevando a cabo a una velocidad casi constante, con excepción de las primeras semanas del proceso indirecto, cuando el incremento fue más alto. Al cabo de las 23 semanas que duró el proceso, 60,32% del carbono extractable del compostaje directo pasó a formar parte de la estructura de los ácidos húmicos y en el compostaje indirecto sucedió lo mismo con 62,23% del carbono extractable, estos valores están muy cercanos al mínimo establecido por Iglesias y Pérez (12) de 62% para compost de residuos urbanos.

La relación C_{NoExt}/C_{Ext} presentó una tendencia al decrecimiento en los dos procesos, siendo más marcada en el compostaje indirecto. En la fase de madurez, el valor de la relación tiende a estabilizarse en valores cercanos a 4,4 para el proceso

directo y 3,7 para el indirecto, situación que se podría explicar por el hecho de que a medida que avanza el proceso, los microorganismos consumen el carbono, disminuyendo así el contenido de carbono no extractable. Se observa que en el compostaje indirecto se alcanzan valores menores al final del proceso, debido a que los dos procesos mostraron tendencias distintas en el contenido de carbono extraído. La relación C_{NoExt}/C_{Ext} en general no ha sido determinada por otros investigadores.

diferenciantes en los ácidos húmicos neoformados.

Martínez-Iñigo y Almendros (14) midieron la relación E_4/E_6 en el extracto acuoso, notando también un decrecimiento en su valor a lo largo del proceso y obteniendo una relación de 2,1 en el producto final en un compostaje de residuos forestales de roble, indicando que los valores obtenidos están dentro del rango para este tipo de materiales.

Tabla 3. Variación de la relación E_4/E_6 de los ácidos húmicos extraídos durante los dos procesos de compostaje.

COMPOSTAJE DIRECTO															
Día	1	8	15	22	29	36	43	57	71	85	99	113	127	141	162
E_4/E_6	5,39	5,28	5,14	4,91	4,85	4,76	4,69	4,68	4,66	4,53	4,42	4,21	3,98	3,62	3,13
COMPOSTAJE INDIRECTO															
Día	1	6	13	20	27	34	41	55	69	83	97	111	125	139	160
E_4/E_6	5,39	5,32	5,16	4,96	4,83	4,78	4,97	4,58	4,52	4,47	4,35	4,22	4,06	3,58	3,16

Los valores son el promedio de tres determinaciones.

En la tabla 3 aparecen los valores de la relación E_4/E_6 para los ácidos húmicos liofilizados extraídos a lo largo de los dos procesos de compostación. Esta relación presenta una tendencia a disminuir, desde 5,39 para el sustrato inicial hasta valores alrededor de 3 en los productos finales, lo que sugiere la formación de sustancias de mayor complejidad, incrementándose por ende el tamaño molecular durante el compostaje. No se aprecia una gran diferencia entre el comportamiento y los valores de la relación en los dos procesos de compostaje, lo cual se puede atribuir a que el proceso de síntesis de los ácidos húmicos es largo y el tiempo de evaluación es corto para poder apreciar rasgos

En la tabla 4 aparecen los porcentajes de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, así como algunas relaciones derivadas de estos para los procesos directo e indirecto. El contenido de los cuatro elementos, así como el valor de las relaciones son muy similares en los dos compostajes, debido a que en el corto tiempo de compostaje no se pueden apreciar grandes diferencias en su composición elemental.

El alto porcentaje de nitrógeno e hidrógeno en los ácidos húmicos extraídos de los dos procesos se debe, probablemente, a la presencia de cadenas laterales alifáticas. El hecho de que el contenido de nitrógeno e hidrógeno descienda a medida que avanza el compostaje se puede ex-

Tabla 4. Composición elemental de los ácidos húmicos en el material compostado en los procesos directo e indirecto.

Día	COMPOSTAJE DIRECTO							COMPOSTAJE INDIRECTO							
	%C	%H	%N	%O	C/H	C/O	C/N	Día	%C	%H	%N	%O	C/H	C/O	C/N
1	48,53	8,15	5,25	38,07	5,95	1,27	9,24	1	48,53	8,15	5,25	38,07	5,95	1,27	9,24
8	48,66	7,80	5,15	38,39	6,24	1,27	9,45	6	48,62	6,64	4,88	39,86	7,32	1,22	9,96
15	49,15	6,71	4,98	39,16	7,32	1,26	9,87	13	49,16	6,05	4,62	40,17	8,12	1,22	10,64
22	49,08	5,59	4,86	40,47	8,78	1,21	9,86	20	49,30	5,75	5,01	39,94	8,57	1,23	9,84
29	49,22	5,50	4,95	40,33	9,94	1,22	9,94	27	49,52	5,41	4,93	40,14	9,15	1,23	10,04
36	49,51	5,45	4,39	40,65	9,08	1,22	11,28	34	49,41	5,38	5,09	40,12	9,18	1,23	9,71
43	50,03	5,64	4,75	39,58	8,87	1,26	10,53	41	49,74	5,64	4,74	39,88	8,76	1,25	10,42
57	49,86	5,71	4,49	39,75	8,73	1,25	11,10	55	50,01	5,50	4,31	40,18	8,81	1,24	10,49
71	50,01	5,36	4,92	39,71	9,33	1,26	10,16	69	50,01	5,48	4,16	40,35	9,12	1,24	12,02
85	50,26	5,28	4,74	39,72	9,52	1,27	10,60	83	50,06	5,39	4,26	40,29	9,29	1,24	11,75
99	50,35	5,42	4,31	39,92	9,29	1,26	11,68	97	50,18	5,25	4,41	40,16	9,56	1,25	11,38
113	50,08	5,39	4,55	39,98	9,29	1,25	11,01	111	50,08	5,38	4,28	40,26	9,31	1,24	11,70
127	50,15	5,28	4,21	40,36	9,50	1,24	11,91	125	50,52	5,45	4,08	39,95	9,27	1,26	12,38
141	50,11	5,27	3,86	40,76	9,51	1,23	12,98	139	50,12	5,24	4,14	40,50	9,56	1,24	12,11
162	50,23	5,13	4,01	40,63	9,79	1,24	12,53	160	50,40	5,03	4,36	40,21	10,02	1,25	11,56

Todos los resultados se presentan en base libre de cenizas.

plicar por la polimerización que están sufriendo los ácidos húmicos.

La relación C/O se mantuvo estable a lo largo del proceso, debido a que existe un aumento proporcional en los contenidos de carbono y oxígeno de los ácidos húmicos; el incremento del carbono se debe a que con el avance del proceso los ácidos húmicos aumentan su tamaño a expensas de condensación de ácidos fúlvicos y otras sustancias que enriquecen su contenido de carbono. La relación C/H es una medida del carácter alifático o aromático de los ácidos húmicos; el incremento que se presenta en dicha relación indica que a lo largo del compostaje se intensifica el carácter aromático de los ácidos húmicos. Además, el valor de la relación en los dos procesos es semejante, lo que indicaría que a nivel estructural no existen diferencias entre los ácidos húmicos provenientes de uno u otro compostaje.

García y colaboradores (7) encontraron que los porcentajes de hidrógeno y de nitrógeno descendían en un proceso de compostaje directo con residuos urbanos, mientras el carbono y el oxígeno aumentaban. Además los ácidos húmicos extraídos del producto final contenían 55,64% de carbono, 6,12% de nitrógeno, 6,32% de hidrógeno y 35,9% de oxígeno. La relación C/H se incrementó siendo finalmente 9,09, la relación C/O se mantuvo relativamente estable, con un valor en el producto final de 2,32, y la relación C/N se incrementó alcanzando un valor final de 11,74; estos resultados reflejan un comportamiento similar al encontrado en el presente trabajo.

Algunos valores promedio de las relaciones para ácidos húmicos en suelos

son (1): C/O 2,08, C/H 1,0 y C/N 20,84. Al compararlas con los valores de los ácidos húmicos en los dos productos finales de compostación, se observa que el grado de aromaticidad de los ácidos húmicos extraídos es mucho más bajo que el de un suelo; esto corrobora que el tiempo de formación de estas sustancias es muy corto y que en realidad no pueden compararse con los verdaderos ácidos húmicos del suelo y que las sustancias orgánicas formadas durante el proceso de compostaje no son estrictamente ácidos húmicos, sino precursoras de las verdaderas sustancias húmicas.

CONCLUSIONES

Los resultados de los parámetros evaluados en este estudio muestran en líneas generales que el grado de humificación varía entre el sustrato y los productos finales de compostación, notándose que la acción de las lombrices (compostaje indirecto) no acelera el proceso de humificación y que éste está limitado por el sistema de compostaje y por la temperatura que en él se genere y mantenga.

Parámetros como el porcentaje de carbono extractable y la relación C_{NoExt}/C_{Ext} no pueden ser considerados como satisfactorios para la evaluación del grado de estabilización del compost, si se tiene en cuenta que registran variaciones ligeras durante el proceso.

El análisis elemental de los ácidos húmicos mostró que los porcentajes de carbono y oxígeno aumentaron ligeramente, los contenidos de nitrógeno e hidrógeno disminuyeron, la relación C/O se mantuvo estable, las relaciones C/H y C/N se incrementaron, mientras que la relación

E_4/E_6 decreció con el avance del proceso de compostaje; esto indica que el carácter aromático de los ácidos húmicos se está incrementando progresivamente.

Para determinar el grado de humificación en el proceso de compostaje, se recomiendan la razón de polimerización y el índice de humificación, puesto que involucran el carbono de los ácidos húmicos, el de los ácidos fúlvicos y el carbono orgánico total, los que presentaron mayor variabilidad durante el compostaje.

El análisis visible, E_4/E_6 , es un confiable método espectroscópico para analizar ácidos húmicos; además presenta amplias ventajas por su bajo costo, facilidad de ejecución y, especialmente, por su marcada variabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Stevenson, F. J. (1986). *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley & Sons: Nueva York, pp. 195-243.
2. Burbano, H. (1989). *El Suelo: Una visión sobre sus componentes biorgánicos*. Universidad de Nariño, Pasto, pp. 189-276
3. Cegarra, J. (1994). Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost. *Memorias VII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo: El componente biorgánico del suelo*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bucaramanga, pp. 22-35.
4. Torrente, A.; Gómez, J. (1995). Metodología para la extracción de sustancias húmicas de lombricompostos y evaluación de sus rendimientos. *Suelos Ecuatoriales*. **25**, 43-46.
5. Gómez, J.; Miranda, J.; Menjivar, J.; Carmen, M.; Torrente, A. (1996). De los residuos a los productos orgánicos. *Memorias Curso Master Internacional: Aprovechamiento de residuos orgánicos*, Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
6. Farías, D. M.; Ballesteros, M. I.; Bendeck, M. (1999). Variación de parámetros fisicoquímicos durante un proceso de compostaje. *Revista Colombiana de Química* **28** (1), 75-86.
7. García, C.; Hernández, T.; Costa, F.; Ayuso, M. (1992). Comparison of humic acids derived from city refuse with more developed humic acids. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23** (13 y 14), 1501-1512.
8. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*, 4a. Edición, Bogotá, D.E.
9. Chen, Y.; Senesi, N.; Schnitzer, M. (1977). Information provided on humic substances by E_4/E_6 ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **41**, 352-358.
10. Roletto, E.; Barberis, R.; Consiglio, M.; Jodice, R. (1985). Chemical parameters for evaluating compost maturity. *Biocycle*. **26** (2), 46-47.
11. Hernández, M. T. et al. (1990). Structural features of humic acids like substances from sewage sludge. *Soil Science*. **49** (2), 63-68.

12. Iglesias, E.; Pérez, V. (1992). Determination of maturity indices for city refuse compost. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. **38**, 331-343.
13. Sugahara, K.; Inoko, A. (1981). Composition analysis of humus and characterization of humic acids obtained from city refuse compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* **23** (2), 213-214.
14. Martínez - Iñigo, M. J.; Almendros, G. (1994). Kinetic study of the composting of evergreen oak forestry waste. *Waste management & Research*. **12**, 305-314.