

Producción y evaluación de compost producido de residuos de la agroindustria de la caña de azúcar

Carlos E. Rolz Asturias,
Luis Roberto de León Fajardo,
Rolando Cifuentes,
Carlos A. Porres

Resumen

Antecedentes: La producción de compost de desechos agrícolas sólidos es una de las alternativas para conservar la calidad del suelo y para minimizar el uso del fertilizante inorgánico y de los plaguicidas químicos.

Objetivos: Se presentan resultados de las investigaciones realizadas las cuales se enfocaron en: a) estudiar el proceso de producción de compost a partir de la cachaza en mezcla con otras materias primas, y b) evaluar la calidad del producto obtenido.

Resultados: La cachaza mostró ser una excelente materia prima para convertirla en compost a través de un proceso de un volteo periódico del material en hileras y con la adición de agua. Se corroboró que la mezcla de la cachaza con 20 a 30 % de bagazo de caña era una mezcla apropiada para su conversión a compost. Se encontró que la pulpa de café podía adicionarse a la mezcla de cachaza y bagazo, preferiblemente en partes iguales. También, podía agregarse gallinaza, preferiblemente en un rango

Abstract

Background: A well produced compost product from solid agricultural residues is an alternative for keeping soil quality and minimizing the use of inorganic fertilizers and chemical pesticides.

Objectives: Results of the research activities are presented which focused on: a) the study of compost production from sugar cane press mud in mixture with other agricultural residues, and b) product evaluation.

Results: Sugar cane filter mud was an excellent raw material transformed into compost in protected windrows, employing frequent mechanical turnings and water additions. A mixture of 20 to 30 weight percent of sugar cane bagasse and filter mud produced an excellent compost. It was found that coffee pulp could also be mixed, preferably in equal parts. Chicken manure was incorporated into the mixture at 10 to 20 % level without major consequences in the process or the resulting product. Process time was estimated from

de 10 a 20 % en la mezcla inicial, sin cambios en el proceso. El tiempo de proceso se determinó con la medición de la estabilidad del producto. Las pruebas biológicas de germinación de semillas y de crecimiento de plantas establecieron la madurez del producto.

stability determinations. Product maturity was checked employing biological tests, seed germination and initial plant growth in pots.

Introducción

El residuo de naturaleza orgánica proveniente de actividades agrícolas se degrada en forma natural en el suelo por la acción de microorganismos. La lenta degradación está afectada por las características del residuo y del entorno ambiental en donde se produce y se acumula. Durante el proceso se producen compuestos gaseosos que en su mayoría provienen de la actividad microbiana. Esta actividad natural puede ser reproducida en forma acelerada de dos maneras: a) empleando un proceso que ocurra bajo la total ausencia de aire y que obligadamente genera metano dentro de los productos gaseosos, y b) en un sistema esencialmente aerobio en donde se genera principalmente dióxido de carbono. El producto sólido residual de este segundo proceso se conoce como compost.

En Guatemala no está generalizado el empleo del compost en la producción agrícola como ocurre en otros países. De hecho el país es un importador de fertilizante inorgánico y de plaguicidas químicos con un alto consumo relativo per capita de estos insumos, cuyo precio unitario ha aumentado paralelamente con el incremento sin precedentes del petróleo a nivel mundial.

Recientemente han aparecido en el mercado productos denominados “abonos orgánicos”, como consecuencia de una demanda causada por el impulso de la agricultura orgánica en el país, que hasta cierto punto ha sido forzado desde fuera por mercados exigentes de calidad y consumidores que buscan productos alimenticios seguros. Uno de estos productos está elaborado a base de pulpa de café, a través del proceso de vermicompost, el cual se realiza a nivel de finca y beneficio, y se utiliza en la propia plantación de café, aunque es posible adquirirlo comercialmente. Otro, es producido por la industria avícola, elaborado de la



gallinaza a través de aireación pasiva en hileras, volteadas mecánicamente en forma periódica. Es relevante mencionar que la gallinaza fresca o parcialmente deshidratada, también se encuentra disponible en el comercio y se agrega como tal al suelo. Por otro lado, la industria cañera, como se muestra en la foto, ha empezado a distribuir en los campos de caña, la cachaza fresca producida en los ingenios con resultados beneficiosos y comprobados en los rendimientos de caña logrados.

Se ha demostrado experimentalmente que un residuo agrícola transformado a compost no solo es más estable, sino que conserva un mayor contenido de nutrientes, principalmente el nitrógeno orgánico, que el residuo agrícola como tal incorporado al suelo. El lector podrá encontrar en un número previo de esta revista una revisión de la literatura sobre el proceso de producción de compost y los efectos beneficiosos de este producto sobre la nutrición de las plantas (Rolz, 2006).

En las siguientes secciones se describen las actividades realizadas, los resultados obtenidos y las principales conclusiones, de la experimentación llevada a cabo para producir compost a partir de la cachaza proveniente de ingenios de azúcar, en mezcla con otras materias primas, y para evaluar la estabilidad del producto obtenido. En especial se puso atención en: a) establecer el tiempo y condiciones de operación para producir un producto biológicamente estable con la mezcla (o mezclas) que se seleccionaron, y b) desarrollar la metodología analítica para determinar algunos indicadores de la estabilidad del compost obtenido.

Descripción de la metodología

Estrategia experimental: debido a la escala de los experimentos, en la cual se procesaban varias toneladas de materiales, se diseñó la estrategia de seleccionar como materia prima básica para la experimentación a la cachaza producida en los ingenios azucareros. Se planificaron, entonces, varias pruebas, realizadas en forma consecutiva, en donde se adicionaba a la cachaza una o varias materias primas más. La proporción de las materias primas en la mezcla se fijaron en base a la literatura consultada. Así se incorporaron en su orden, el bagazo de caña, la pulpa de café y la gallinaza. La variable principal de respuesta o dependiente fue el grado de estabilidad del compost, estimado como se describe más adelante en esta sección. Las variables que fueron registradas durante el proceso fueron, la temperatura, la humedad y el pH del material en las hileras, y se efectuaron análisis en el laboratorio para determinar el contenido de cenizas y nitrógeno, los cuales sirvieron de indicadores. La frecuencia del volteo del material en las hileras se estableció en forma casuística, ya que se cambió de acuerdo a la respuesta que se observaba de los materiales durante el largo período del proceso.

- **Materias primas:** los dos subproductos de los ingenios de azúcar, la cachaza (impurezas sólidas separadas en el proceso de la obtención del azúcar cristalizado de la caña de azúcar) y el bagazo (residuo sólido que queda después de extraer el jugo), se obtuvieron del Ingenio Madre Tierra, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. La pulpa de café (la cáscara del grano maduro) se



obtuvo de un beneficio de Pueblo Nuevo Viñas, Santa Rosa y la gallinaza (estiércol y orina mezclados con paja, en este caso de arroz) de una pequeña granja avícola de Escuintla.

- **Mezclas:** en el Cuadro 1 se indica la proporción de las materias primas en las diferentes mezclas. Las filas identifican a los materiales y en las columnas se anota el número de materias primas en la mezcla y cuales fueron (por sus siglas). Los materiales

fueron descargados por camiones y quedaron amontonados a la intemperie por algunos días. Se prepararon dos hileras con las dimensiones siguientes: entre 24 y 25 metros de largo, 2.10 metros y 0.85 metros de base y altura máximas respectivamente. Las hileras se encontraban a resguardo del sol en una galera, la cual se describirá más adelante. En cada hilera habían entre 8.5 a 9 toneladas de la mezcla fresca. La preparación de las mezclas en las proporciones fijadas se llevó a cabo manualmente empleando carretas de volumen conocido. Previamente se determinó la humedad y la densidad aparente de cada materia prima.

La foto ilustra dos hileras dentro de la galera. En ella se notan los lugares en donde se había obtenido una muestra, previo a ser volteadas. Generalmente eran cinco posiciones a lo largo de la hilera. Las cinco muestras se mezclaban para obtener una muestra compuesta, la cual se transportaba al laboratorio en donde se guardaba bajo refrigeración.

Cuadro 1

Proporciones de materias primas en las mezclas (% en peso seco)

	2-C8B2	2-C7B3	2-CP	2-CG	3-CBG	3-CPG	3-CBP
Cachaza (C)	80	70	50	80	50	40	30
Bagazo (B)	20	30	0	0	40	0	35
Pulpa de café (P)	0	0	50	0	0	50	35
Gallinaza (G)	0	0	0	20	10	10	

- **Equipo para producir compost:** la elaboración se llevó a cabo en una galera con columnas de metal, de techo de lámina y pared abierta, mostrada en la foto, de 40 metros de longitud por 12 metros de ancho, en piso de tierra compactado.



El equipo volteador fue un *Mighty Mike 80®*, de marca *Frontier*¹, con un dispositivo para agitar, accionado a través de un acople mecánico a un tractor agrícola *John Deere* Modelo 5303; contando además, de un tanque plástico y un sistema de regaderas interno para agregar agua durante el volteo, como puede apreciarse en las fotos siguientes.

- **Densidad aparente de las materias primas:** La densidad aparente se estimó de la manera siguiente. Se llenó un frasco de vidrio de 1 litro de capacidad de peso conocido con el material en cuestión, teniendo cuidado de no compactarlo, ni por movimiento, ni por presión. Se registró el peso en una balanza Ohaus (*T54000 Precision Standard*) Con estos datos se calculó la densidad en gramos de peso fresco por litro o en su equivalente a otras unidades.



- **Temperatura del material:** en forma periódica y antes de efectuar el volteo se obtuvo la temperatura del material por medio de termómetros de bayoneta insertados entre 25 a 30 cms en cinco posiciones a lo largo de la hilera. Ocasionalmente las lecturas se corroboraban empleando termopares y un registro automático (*Explorer GLX Data Logger PS2526, PABSCO*).



¹<http://www.frontierindustrial.net>

- **Humedad del material:** se pesaron dos gramos de la muestra compuesta en una balanza Ohaus (*Ohaus MB45 Moisture Analyzer*) y se ajustaron los controles de tal manera que el ciclo de secado fuera de 90 minutos a 100 °C. La lectura de la balanza se expresaba directamente en % de humedad. En varias ocasiones se confirmaron las lecturas procediendo de la manera tradicional en la forma siguiente: se pesaron dos gramos en un recipiente de porcelana de peso conocido; luego se colocaron en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 80 °C hasta peso constante, el cual se logró entre las 24 a las 36 horas. Las diferencias en peso entre los dos procedimientos fueron <0.10 %.
- **Contenido de cenizas:** el material seco anterior se colocó en una estufa (*Fisher Scientific Isotemp 500 Series*) a 250 °C por dos horas. Luego en un horno (*Furnace Thermolyne 62700*) a 600 °C durante 3 horas. Enfriado se pesó. Con el peso del residuo se calculó el contenido de cenizas. La diferencia o material volatilizado permitió estimar el contenido de materia orgánica.
- **pH:** se pesaron 10 gramos y se les agregó 50 mL del agua del chorro. Luego de una breve agitación manual se dejó reposar a temperatura ambiente por una hora. El pH se midió en el líquido claro separado (*ICM pH Meter and Controller Model 45100*). *Nota:* si la muestra estaba refrigerada se dejaba por lo menos 3 horas a temperatura ambiente antes de pesarla. *Aclaración:* existe una considerable variabilidad en la literatura consultada respecto a la proporción de material sólido y agua a emplear en esta determinación, así como del tiempo que debe dejarse en reposo.
- **Contenido de nitrógeno total:** se empleó el procedimiento Kjeldahl recomendado por la AOAC (1984)
- **Estabilidad del compost:** se procedió de dos maneras. En la primera se utilizó el test Solvita®. Esta prueba estima la cantidad liberada de amoníaco y de dióxido de carbono por una cantidad de material en un tiempo de 4 horas a la temperatura ambiente. Se llevó a cabo en un recipiente, mostrado en la foto, en el cual se colocaba el material en prueba y una paleta que tiene una zona con sustancias indicadoras sensibles a los gases anteriormente mencionados. Se tapó y se esperó el tiempo especificado. El cambio en el color de la zona en la paleta permitió estimar la cantidad de gas liberado por una comparación con escalas previamente calibradas proporcionadas por la empresa. La segunda técnica empleada fue un ensayo biológico de germinación de semillas de maíz y frijol. Para llevarla a cabo se molió el material en prueba y se colocó en macetas. Se determinó la capacidad de retención de agua de cada mezcla con el objeto de fijar el plan de riego. Se pusieron cinco semillas de maíz y frijol por maceta con tres repeticiones por mezcla. Las macetas se colocaron en un invernadero



y se observaron diariamente. El porcentaje de germinación para cada mezcla se reportó como el promedio de las tres repeticiones.

- Madurez del compost:** Se molió el compost de las diferentes hileras. Se adicionó, en las proporciones especificadas a continuación, suelo proveniente, ya sea de ALTIPLANO (Km. 137 Aldea El Tablón Carretera a Panajachel, Sololá, Sololá) o de PROESUR (Km. 92.5 Finca Camantulul Carretera a Mazatenango, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintal). La proporción de compost fue de 0.25, 0.50, 1.00, 2.50, 5.00, 25.00, 50.00, y 75.00% en peso. Además se incluyó un ensayo con solo el suelo y otro ensayo con 100 % de compost. Las diferentes mezclas se colocaron en macetas, las cuales se colocaron en un invernadero. Las plantas se cultivaron por 30 días después de la emergencia, agregando agua dos veces a la semana. Al final de este período, el material vegetal se cortó al nivel del suelo. Se secó inmediatamente a 60 °C hasta alcanzar un peso constante (alrededor de 72 horas).

- Determinación del consumo de oxígeno:** Se colocaron 40 gramos del material en

proceso en un recipiente de plástico. El recipiente se colocó en un horno incubador (*Fisher Scientific Isotemp Incubator*) a 60 °C por un tiempo entre 30 y 45 minutos. Se retiró del horno e inmediatamente se adaptó la probeta de oxígeno y se registró automáticamente por un tiempo de cinco minutos el contenido de oxígeno del espacio gaseoso en el recipiente (*Explorer GLX Data Logger PS2526, PABSCO*). El equipo se muestra en la foto respectiva.

- Estimación del cociente C/N:** En base a 100 gramos de compost seco, se estimó el contenido de carbono de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Carbono}_{total} \% = (100.00 - \text{Cenizas}\%) * 0.5555$$

Luego se procedió a la estimación del cociente propiamente dicho, empleando la ecuación siguiente:

$$\text{Cociente } \frac{C}{N} = \frac{\text{Carbono}_{total} \%}{\text{Nitrógeno}_{total} \%}$$

- Estimación de las pérdidas de carbono y nitrógeno durante el proceso:** Se emplearon las fórmulas siguientes dadas en la literatura, en donde, X_1 y N_1 son los contenidos de ceniza y nitrógeno respectivamente al inicio del proceso, y X_t y N_t son los contenidos de ceniza y nitrógeno respectivamente al tiempo de proceso t :

$$C (\text{pérdida}\%) = 100 - 100 \frac{(X_t (100 - X_1))}{(X_1 (100 - X_t))}$$

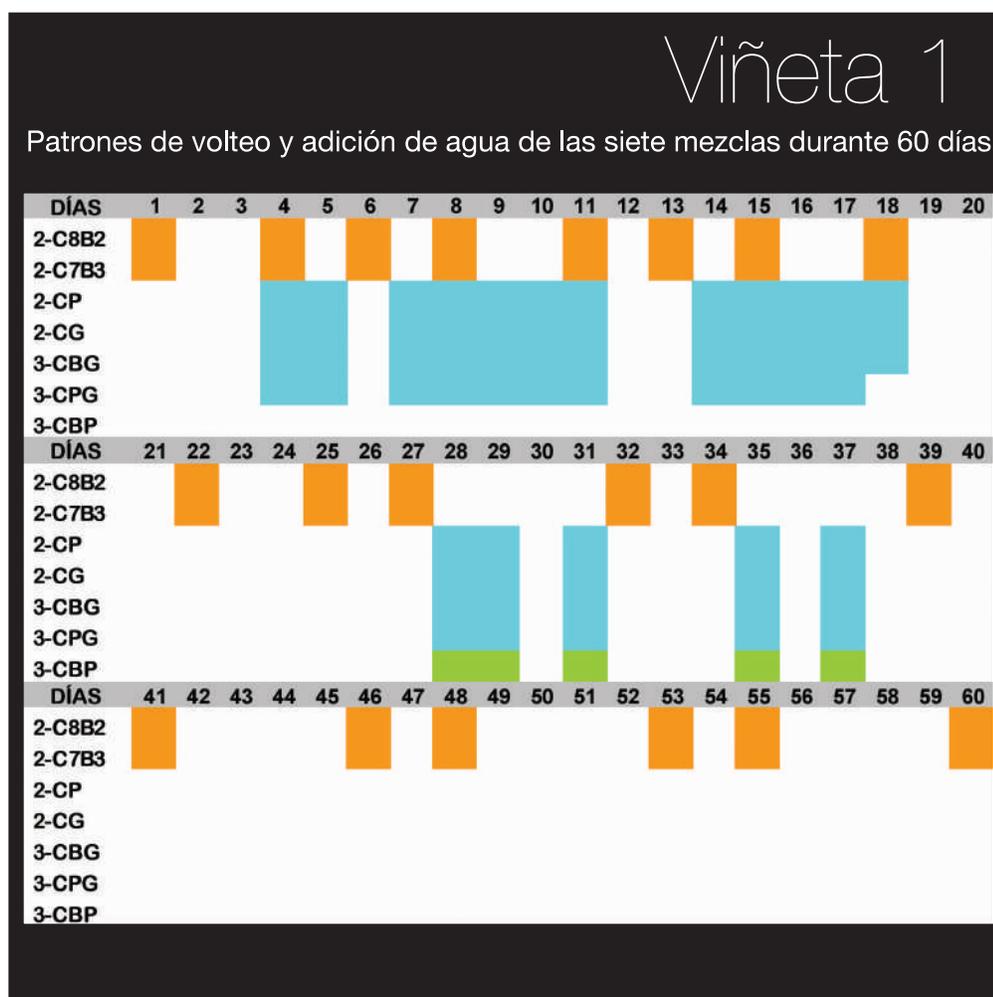
$$N (\text{pérdida}\%) = 100 - 100 \frac{X_t N_t}{X_1 N_1}$$



Resultados

El manejo de los sólidos y la manera de introducir aire al sistema son los factores que influyen en el proceso. El sistema usado puede decirse que consistió en una aireación pasiva con volteo intermitente del material colocado en hileras, descrito en la literatura (Rynk and Richard, 2001). Se emplearon tres patrones distintos para realizar los volteos como se muestra en la Viñeta 1. El primero consistió en un programa de 20 volteos distribuido igualmente durante sesenta días del proceso, aplicado a las mezclas 2-C8B2 y 2-C7B3. El segundo de 17 volteos, se aplicó a cuatro mezclas, 2-CP, 2-CG, 3-CBG y 3-CPG, el cual tuvo una mayor frecuencia al inicio del proceso. Finalmente el tercero en donde el volteo se realizó 5 veces en la etapa intermedia, aplicado únicamente a la mezcla 3-CBP.

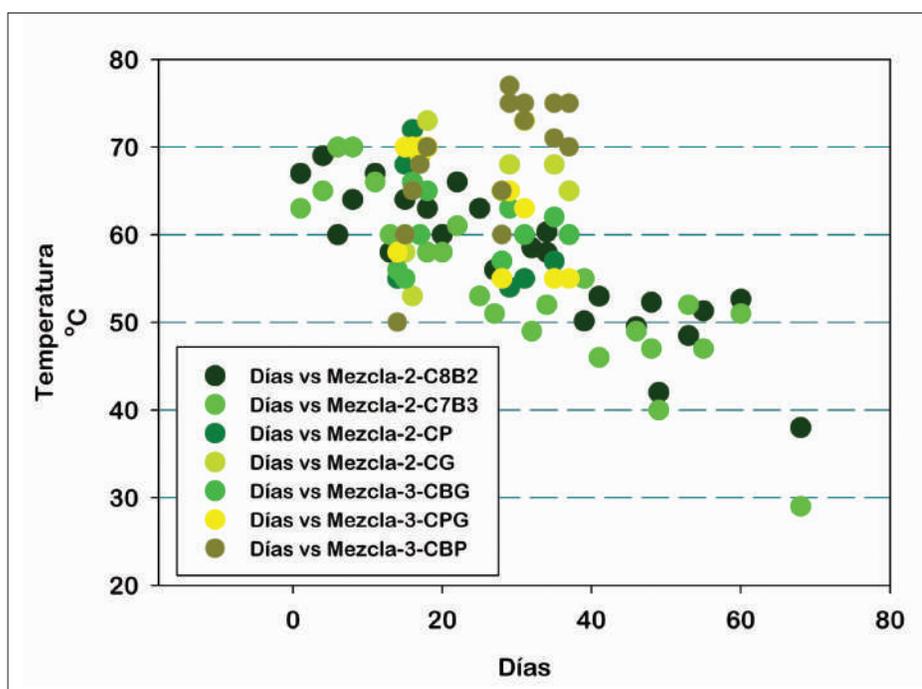
La mezcla de los sólidos y su contacto con aire favorecen el crecimiento de microorganismos aerobios que inician el proceso de oxidación biológica de la materia orgánica. Este proceso es exotérmico, y como resultado del mismo, la temperatura del material en las hileras aumenta drásticamente, favoreciendo la proliferación de microorganismos termofilicos (Pedro, Haruta et al. 2003)



En la Gráfica 1 se encuentran los valores de la temperatura en función del tiempo de proceso. Se observa que la temperatura llegó en pocos días a valores entre 60 y 70 °C como era lo esperado, con la excepción de la mezcla 3-CBP. Dicha mezcla aumentó su temperatura hasta el momento de iniciar el volteo, el cual fue tardío en relación a las demás. Se observa también que en ese caso se alcanzaron las mayores temperaturas anotadas. Por otro lado, la temperatura estuvo en un franco descenso después de los 40 días, en las mezclas 2-C8B2 y 2-C7B3, a pesar de continuar con el volteo, indicando con esto que los sustratos que mantenían la actividad microbiana se estaban agotando.

Gráfica 1

Cambios de temperatura del material dentro de las hileras con respecto al tiempo



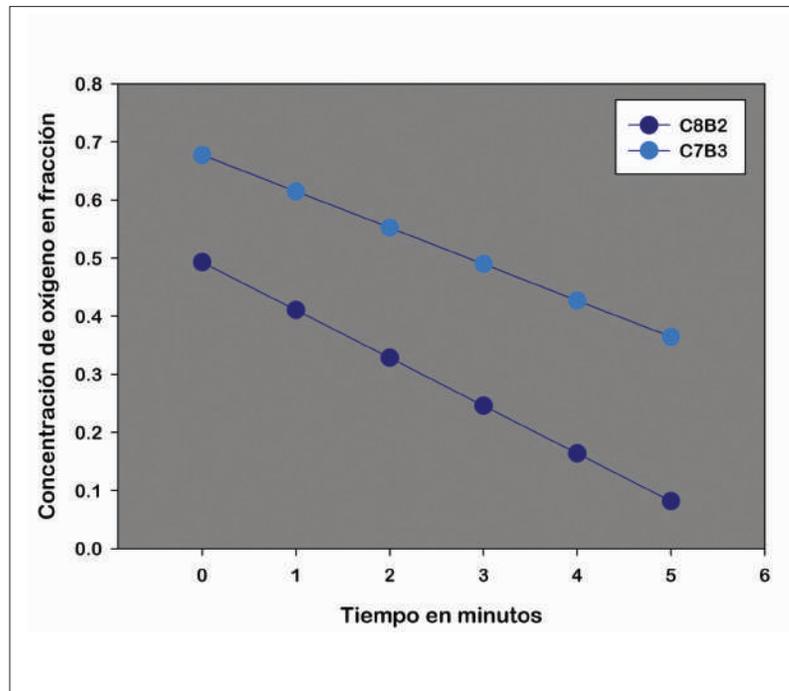
La alta temperatura alcanzada por el material en proceso es la causa principal de la eliminación de hongos, bacterias, virus y nemátodos que pudiesen encontrarse presentes en las diferentes materias primas, resultando con ello, un producto libre de factores causantes de enfermedades de las plantas (Suarez-Estrella, Vargas-García et al. 2007; Vinneras 2007).

El consumo de oxígeno a los 34 días del material de dos hileras se muestra en la Gráfica 2. Se observa que la disminución del oxígeno en la fase gaseosa fue rápida y que en poco tiempo la actividad microbiana quedó limitada por la disponibilidad de este factor. En estas condiciones limitantes es común la producción de metano

por bacterias anaeróbicas presentes (Cabanas-Vargas & Stentiford 2006). Los datos de la fracción de oxígeno en el aire mostrados en la gráfica no empezaron en la unidad ya que el recipiente con el material estuvo un tiempo en un horno como se explicó en la sección anterior.

Gráfica 2

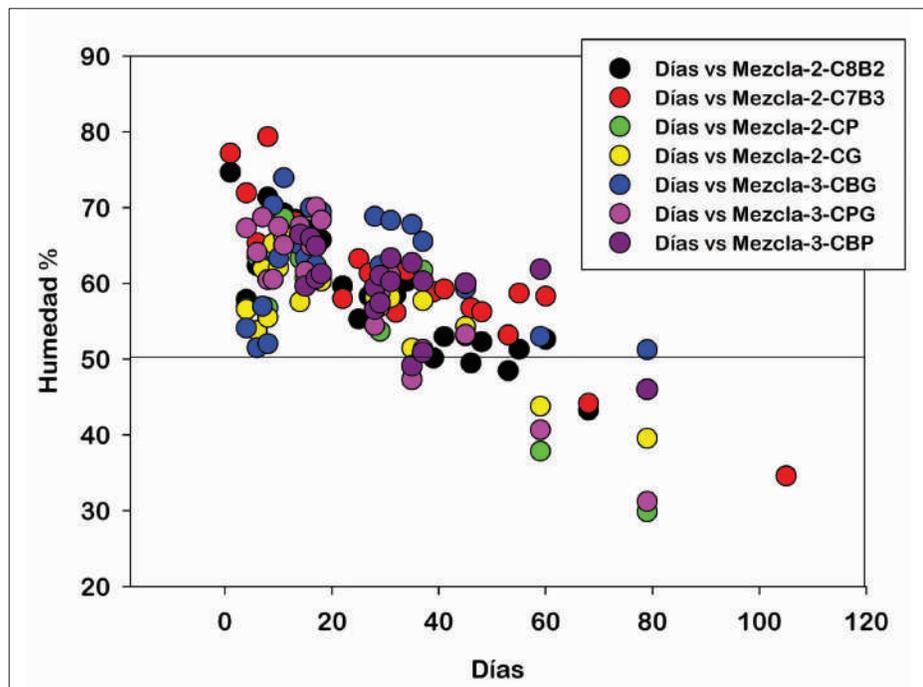
Consumo de oxígeno de compost a 60 °C



La adición de agua durante cada volteo permitió mantener los materiales a la humedad adecuada para mantener una actividad microbiana. Los cambios de la humedad se observan en la Gráfica 3.

Gráfica 3

Cambios de humedad del material dentro de las hileras con respecto al tiempo.



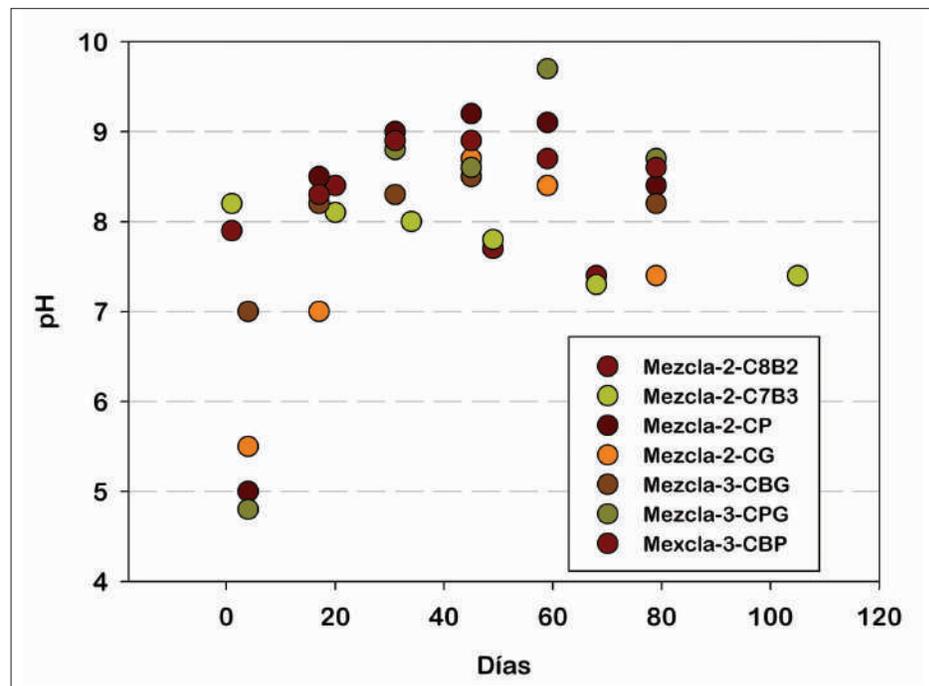
Se observa que la adición periódica de agua a las hileras durante el volteo aseguró que la humedad estuviese arriba de 50 % durante la fase inicial termofílica sustentando la alta actividad microbiana. La tendencia de cambio de la humedad respecto al tiempo fue prácticamente la misma para todos los ensayos por lo que se concluye que los diferentes patrones de volteo y adición de agua produjeron el mismo resultado. Después de los 60 días, el material en reposo en las diferentes hileras perdió humedad conforme la temperatura del mismo disminuía.

Los microorganismos degradan y transforman la materia orgánica presente en las materias primas generándose CO_2 . El carbono residual en el producto final se encuentra presente en compuestos químicamente complejos denominados ácidos húmicos. Recientemente se han iniciado estudios para una mejor caracterización química de dichos ácidos con el objeto de relacionar la estructura química con la calidad del producto (Adani, Genevini et al. 2007) La calidad del compost en este caso está definida y directamente relacionada con los efectos beneficiosos que su adición tiene sobre las propiedades del suelo, entre las que destacan, una mayor retención de agua y de la capacidad de intercambio catiónico, una mejoría de la estructura física, una disminución de la acidez, un incremento en la cantidad de la materia orgánica y una mejor calidad de la misma.

Por otro lado, durante el proceso una fracción del nitrógeno orgánico proteico presente en las materias primas se transforma por la acción microbiana, primero en amoníaco, y luego en nitrato, reteniéndose en esa forma química en el producto final. La mayoría del nitrógeno que se escapa a la atmósfera lo hace en forma de amoníaco (NH_3), o en forma de óxidos de nitrógeno (N_2O) resultantes de la nitrificación del ion amonio (Raviv, Medina et al. 2004, Thompson, Wagner-Riddle et al. 2004, Chou & Biiyuksonmez 2006; Pagans, Barrena et al. 2006). La producción de amoníaco puede deducirse indirectamente a través de los cambios de pH del material en las hileras. Los cambios de pH registrados se muestran en la Gráfica 4.

Gráfica 4

Cambios de pH del material dentro de las hileras con respecto al tiempo



La tendencia del cambio en el tiempo mostrada en la gráfica, similar para todos los ensayos, evidencia el efecto que sobre el pH del material tiene la producción microbiológica del amoníaco. En algunos casos el pH alcanzó y superó el umbral de 9. En esos momentos se supone que se desprendían hacia la atmósfera NH_3 y N_2O . También se observaron los dos hechos siguientes: a) al inicio, las dos mezclas con pulpa de café mostraron los valores de pH más bajos, y b) al final del periodo en todas las hileras, el pH se encaminaba a valores entre 7 y 8, y supuestamente en ese tiempo, el nitrógeno se fijaba como nitrato.

En el Cuadro 2 se muestran los cambios del cociente carbono a nitrógeno (C/N) durante el tiempo de proceso para todas las mezclas. El carbono se calculó como se especificó en la sección anterior. Se observa al inicio que las mezclas que contenían bagazo mostraron un cociente mayor, resultante de los contenidos relativos, mayor de fibra y menor de nitrógeno, de esta materia prima. Los valores del cociente al final del proceso fueron los esperados y calificados como normales en la literatura (Stentiford & Dodds1992; Day & Shaw, 2001).

Cuadro 2

Cambios del cociente C/N durante el tiempo de proceso

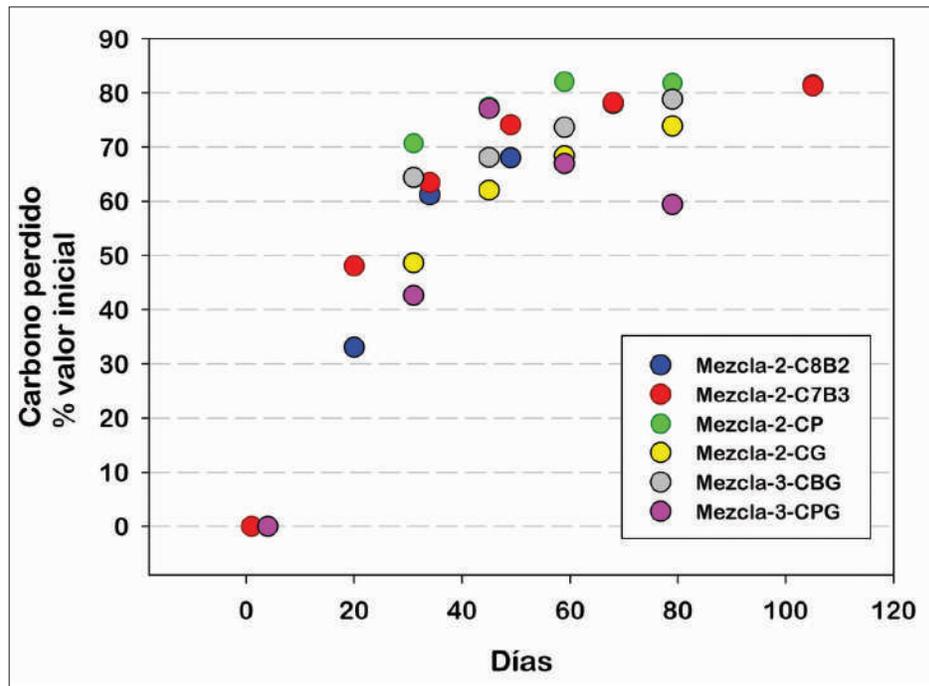
Días	2-C8B2	2-C7B3	2-CP	2-CG	3-CBG	3-CPG	3-CBP
1	40.75	48.46					
4			26.59	22.18	50.59	23.93	
17							30.28
20	39.33	40.03					
31			11.49	12.92	18.97	12.88	18.77
34	29.11	37.56					
45			13.78	15.26	23.61	13.64	16.47
49	26.49	32.52					
59			12.71	13.17	18.96	12.11	14.01
68	29.49	32.35					
79			10.41	10.48	14.23	10.53	12.19
105	23.81	22.11					

En las Gráficas 5 y 6 se presentan los cambios en el contenido de carbono y nitrógeno de los materiales en las hileras, expresados como la pérdida acumulativa en relación al contenido inicial de ambos elementos. Las pérdidas fueron estimadas como se detalló en la sección anterior. La cantidad de carbono y nitrógeno perdida se materializó como emisiones gaseosas de CO₂, NH₃ y N₂O, como se explicó anteriormente. No se incluyeron los datos para la mezcla 3-CBP ya que no se obtuvo la información analítica correspondiente al inicio del proceso.

Se observa que se perdió entre un 60 a 80 % de carbono inicial a los 80 días de proceso. La pérdida de nitrógeno fue menor, entre un 40 a 70 % del valor inicial. También fue evidente en ambos casos que la tasa de producción gaseosa fue mas intensa al inicio del proceso, cuando la temperatura y la humedad del material eran altas.

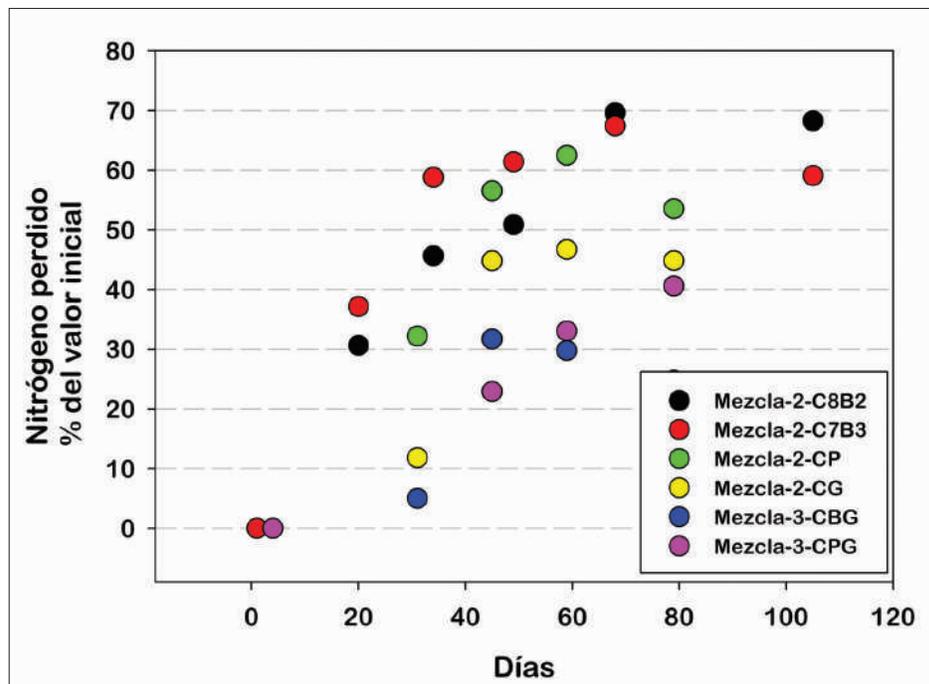
Gráfica 5

Emissiones gaseosas de carbono del material en las hileras respecto al tiempo



Gráfica 6

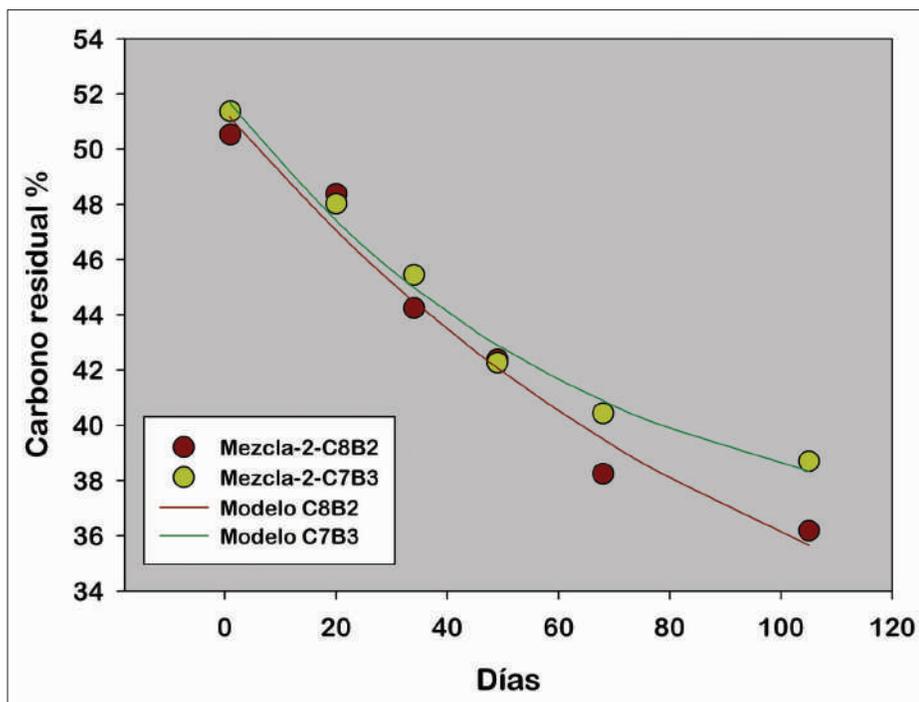
Emissiones gaseosas de nitrógeno del material en las hileras respecto al tiempo



En las Gráficas 7, 8 y 9 se presentan los datos experimentales ajustados a un modelo que permite estimar la cantidad de carbono residual en el compost en función del tiempo de proceso. La descripción del modelo empleado y los detalles del ajuste numérico se explican en la Viñeta 2. Las siguientes observaciones son pertinentes: a) el modelo del decaimiento exponencial de tres parámetros se adapta en forma adecuada a cinco de las mezcla ensayadas (Gráficas 7 y 8), b) el valor de los parámetros fue significativo ($P < 0.05$), con la excepción del parámetro beta de la primera mezcla, c) no se identificaron puntos de una influencia extraordinaria sobre el valor de los parámetros, ya que no existió un residuo con una distancia de Cook arriba del umbral de 1.0, d) los datos de la mezcla 3-CBG fueron ajustados por una línea recta, debido a la tendencia mostrada, como se aprecia en la Gráfica 9, e) de nuevo, el valor de los parámetros fue significativo ($P < 0.05$) y no se identificaron puntos de una influencia extraordinaria en el ajuste.

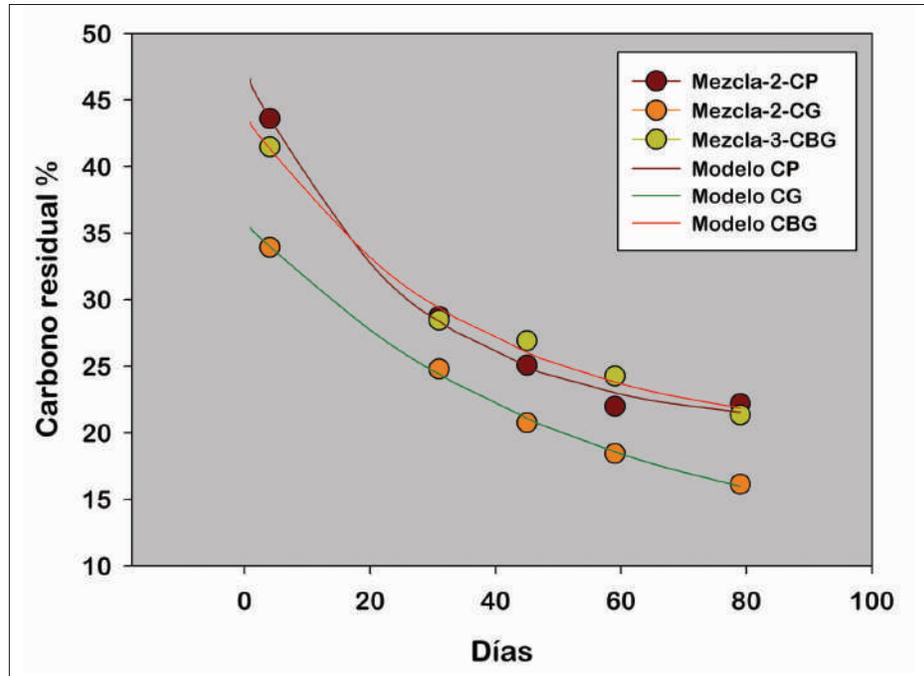
Gráfica 7

Ajuste del modelo para predecir la degradación biológica del carbón:
mezclas 2-C8B2 y 2-C7B3



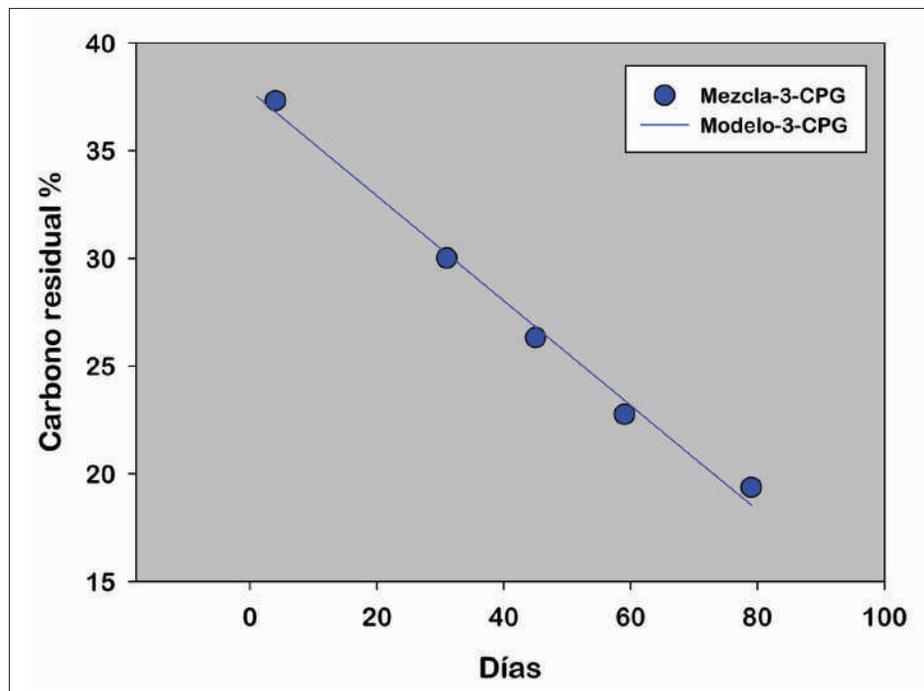
Gráfica 8

Ajuste del modelo para predecir la degradación biológica del carbón: mezclas 2-CP, 2-CG y 2-CBG



Gráfica 9

Ajuste del modelo para predecir la degradación biológica del carbón: mezcla CPG



Viñeta 2

Características del modelo y del ajuste a los datos del carbono residual en función del tiempo

El modelo escogido es el de un decaimiento exponencial de tres parámetros:

$$y = y_0 + \alpha e^{-\beta x}$$

En donde y_0 , α y β son parámetros cuyos valores fueron obtenidos para cada conjunto de datos experimentales empleando el algoritmo Marquardt-Levenberg implementado por SigmaPlot®² versión 10.

Los resultados se presentan en el cuadro a continuación para cinco mezclas. La primera columna identifica la mezcla de materiales. El valor obtenido en el ajuste para los tres parámetros y la probabilidad asociada a este valor para no ser cero, se encuentran en las columnas dos a la cuatro. Un diagnóstico de la influencia de los puntos sobre el ajuste (distancia de Cook para los residuos) se resume en la columna cinco.

Mezcla	y_0 (P)	α (P)	β (P)	Distancia Cook residuos
2-C8B2	26.80 (0.0455)	24.61 (0.049)	0.0097 (0.1411)	<1.0
2-C7B3	35.12 (0.0004)	16.85 (0.0029)	0.0158 (0.0218)	<1.0
2-CP	20.32 (0.0022)	27.32 (0.0014)	0.0394 (0.0118)	<1.0
2-CG	10.53 (0.0154)	25.37 (0.0023)	0.0195 (0.0097)	<1.0
3-CBG	19.39 (0.0079)	24.68 (0.0044)	0.0291 (0.0286)	<1.0

Los resultados del ajuste de los datos experimentales de la mezcla 3-CPG con el modelo lineal fueron:

$$y = y_0 + \alpha x$$

Mezcla	y_0 (P)	α (P)	Distancia Cook residuos
3-CPG	37.77 (<0.0001)	-0.2433 (0.0001)	<1.0

²www.systat.com

En el Cuadro 3 se presentan los valores del test Solvita® para las mezclas obtenidos en días determinados. Se nota que al transcurrir el tiempo los indicadores mostraron un material más estable, es decir que aumentaron los números del test y disminuyeron las tasas de producción de CO₂ y NH₃. Sin embargo, en todos los casos todavía mostraban las mezclas en las hileras al finalizar el tiempo de evaluación una producción de gases, por lo que se dejó en reposo por lo menos 60 días antes de hacer cualquier evaluación de madurez.

Cuadro 3

Valores del test Solvita® durante el proceso

Mezcla	Días de proceso	Indicador de producción de CO ₂	Indicador de producción de NH ₃
2-C8B2	111	6.0	6.0
2-C7B3	111	6.0	6.0
2-CP	31	4.0	4.0
2-CP	59	4.5	4.0
2-CP	81	6.0	5.0
2-CG	31	4.5	2.0
2-CG	59	5.5	4.0
2-CG	81	7.0	5.0
3-CBG	31	5.0	5.0
3-CBG	59	6.0	5.0
3-CBG	81	7.0	5.0
3-CPG	31	3.5	3.0
3-CPG	59	4.5	5.0
3-CPG	81	6.0	5.0
3-CBP	31	5.0	4.5
3-CBP	59	5.5	5.0
3-CBP	81	6.0	5.0

Los resultados de la germinación de semillas de maíz y frijol en un lecho de un 100 % de compost, para algunas de las mezclas, se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4

Ensayos de germinación

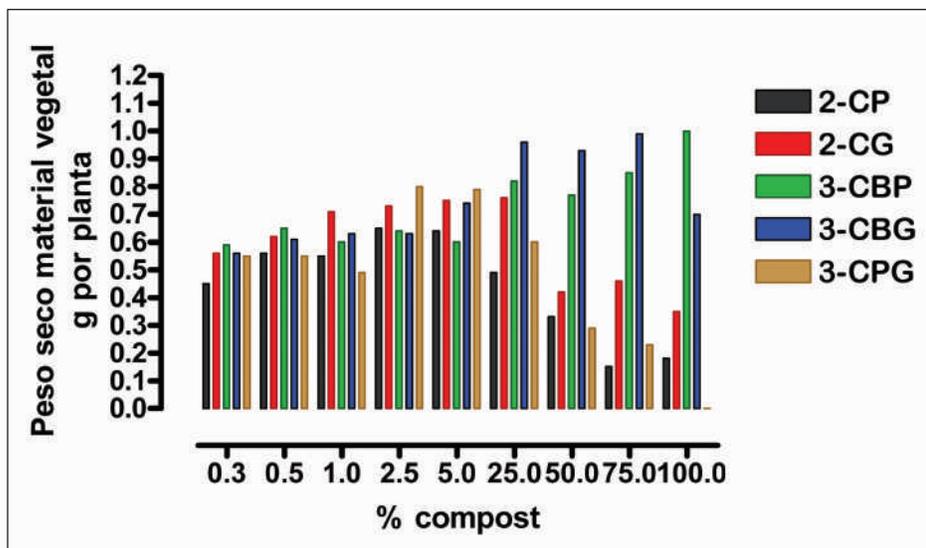
Mezcla	Días de prueba	% germinación de semillas de maíz	% germinación de semillas de frijol
2-CP	15	60	13
2-CP	22	80	33
2-CG	15	47	73
2-CG	22	80	93
3-CBG	15	80	87
3-CBG	22	87	93
3-CPG	15	33	0
3-CPG	22	60	27
3-CBP	15	82	91
3-CBP	22	95	96

Se nota inmediatamente que los datos obtenidos para el compost de las mezclas que contenían una proporción de pulpa de café (2-CP y 3-CPG) fueron relativamente inferiores a las demás. La excepción fue la 3-CBP en donde además de la pulpa estaba presente el bagazo de caña. En las otras muestras los datos indicaron la ausencia de toxicidad hacia las semillas, a pesar de que el producto todavía mostraba emanaciones de gases relativamente pequeñas.

El crecimiento de frijol, expresado como el peso seco del material vegetal, en mezclas del compost maduro de las hileras y suelo de ALTIPLANO y PROESUR se muestran en las Gráficas 10 y 11.

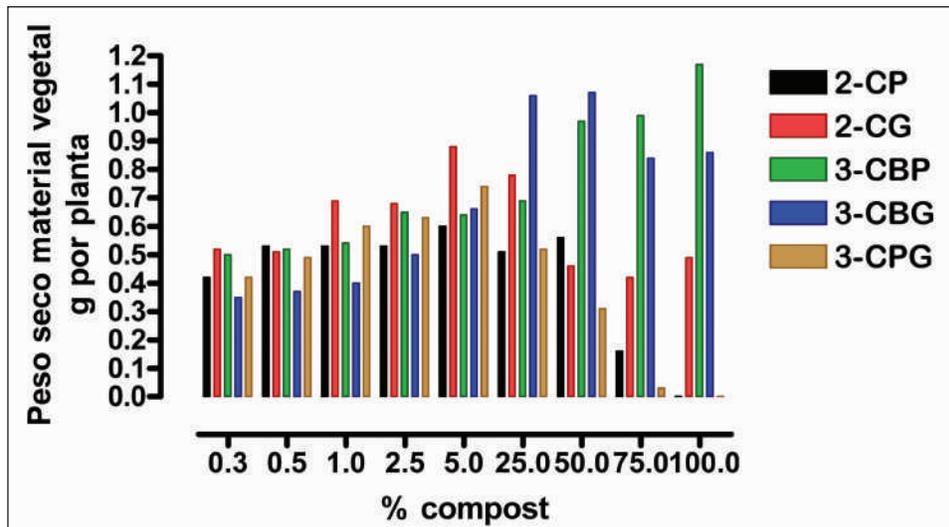
Gráfica 10

Crecimiento de frijol con suelo del ALTIPLANO



Gráfica 11

Crecimiento de frijol con suelo de PROESUR



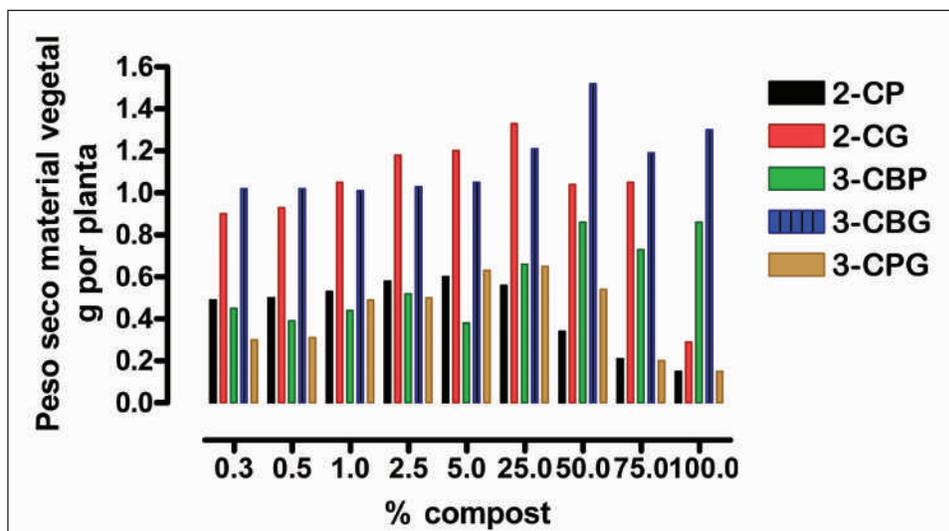
Puede notarse que la adición de compost al suelo hasta niveles de un 25 % fue beneficiosa ya que se incrementó gradualmente el peso seco del material vegetal.

Para las mezclas conteniendo cachaza, pulpa de café y/o gallinaza, arriba del umbral anterior se observó un deterioro paulatino del crecimiento de la planta. No así en los dos casos en donde se incluía en la mezcla una proporción de bagazo de caña. En esos casos, el peso seco continuó aumentando hasta llegar a un nivel. El tipo de suelo empleado no influyó en los resultados anteriores.

Resultados similares para tomate se presentan en las Gráficas 12 y 13.

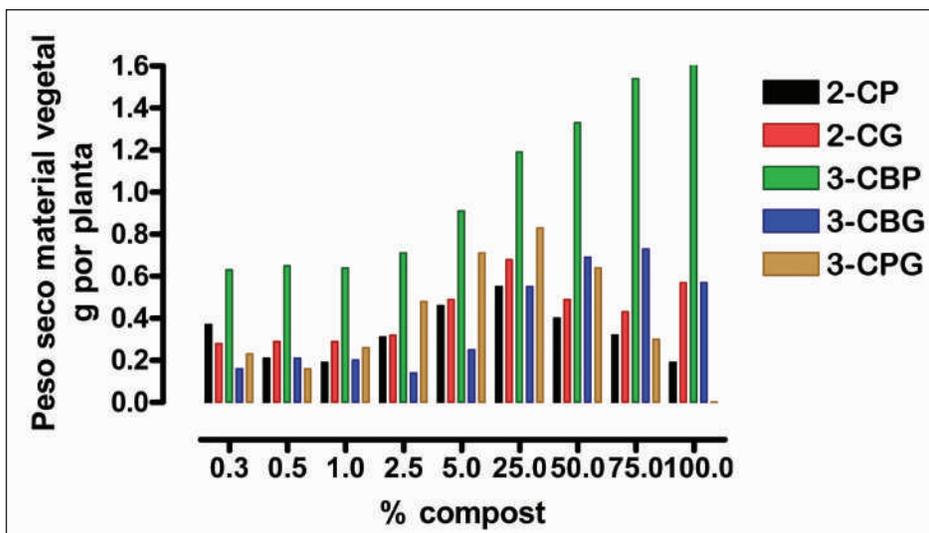
Gráfica 12

Crecimiento de tomate con suelo del ALTIPLANO



Gráfica 13

Crecimiento de tomate con suelo de PROESUR



Las tendencias de las respuestas logradas al emplear el tomate fueron similares a las del frijol, pero no tan marcadas. En esta caso si se observaron diferencias entre el tipo de suelo, principalmente en las mezclas conteniendo bagazo (3-CBP y 3-CBG).

Discusión de resultados

Uno de los parámetros más importantes en la producción comercial del compost es el tiempo que la mezcla de materias primas debe permanecer en las hileras, ya que ese factor incide directamente en la productividad de la planta industrial y por ende en los costos de producción (Criner, Allen et al 2001). Como se dijo anteriormente, el proceso de producción termina cuando el lote está, no solo estable (ausencia de la biodegradación de los sustratos), sino que también maduro (ausencia de una toxicidad a las plantas de cultivo).

En esta investigación, el tiempo de proceso mostró ser prácticamente similar para cualquiera de las mezclas procesadas, y a su vez, independiente de la frecuencia del volteo. Hay que advertir, sin embargo, que dada la estrategia seguida en el experimento, en donde, la frecuencia del volteo se fue adaptando de acuerdo a la respuesta que se observaba de los materiales durante el largo período de la degradación biológica de la materia orgánica, era difícil esperar diferencias notables en cualesquiera de los parámetros del proceso. Por otro lado, llegar a establecer el fin del proceso resultó complicado, puesto que no existe entre

los investigadores un consenso relativo a los indicadores de estabilidad y madurez del compost y de sus valores para diferentes materias primas (Warman 1999; Sullivan & Miller 2001; Wu & Ma 2002; Brewer & Sullivan 2003; Changa, Wang et al. 2003; Domeizel, Khalil et al. 2004; Emino & Warman 2004; Castaldi, Alberti et al. 2005; Tiquia 2005; Adani, Genevini et al. 2006; Adani, Ubbiali et al. 2006; Albuquerque, Gonzalves et al. 2006; Chikae, Ikeda et al. 2006; Matteson & Sullivan 2006; Scaglia, Erriquens et al. 2007). Aún así, puede concluirse que el tiempo requerido para producir compost fue de aproximadamente 120 días (cuatro meses), en los cuales, 80 días, eran de un activo volteo y humidificación del material en las hileras. El resto del tiempo el material quedaba en reposo. El producto obtenido tenía un cociente C/N <25, frecuentemente entre 10 y 15, tenía un pH entre 7.3 y 8.7 y mantenía el índice del test Solvita® >6.0.

En un experimento llevado a cabo en México (Sánchez, Olguín et al. 1999), similar al reportado acá, se obtuvieron tiempos de proceso menores (50 días). En las mezclas ensayadas, la pulpa de café fue el componente mayoritario. Además, se emplearon cachaza, gallinaza y astillas de madera (en lugar de bagazo de caña). El índice de estabilidad empleado fue únicamente el cociente C/N. Las hileras eran de un metro cúbico y el volteo era manual, una vez a la semana. En otro estudio realizado en Tailandia (Meunchang, Panichsakpatana et al. 2005) se produjo compost de cachaza y de cachaza mezclada con bagazo de caña (en una proporción de dos a uno). Los autores concluyeron que el compost estaba estable a los 90 días, de acuerdo al valor del cociente C/N. La mezcla (150 kg.) se ponía en un tanque de concreto (1.2 m. de diámetro y 0.8 m. de altura) y se mezclaba manualmente cada 3-5 días. Un trabajo reciente realizado en India (Satisha & Devarajan 2007) reporta de la producción de compost de cachaza en un período de 120 días, aunque menciona que el producto mostraba madurez a los 90 días. La cachaza se mezcló con diferentes proporciones con bagazo de caña, residuos de caña del campo, biomasa de jacinto acuático, fibra de coco, lodos de levadura de una destilería y aditivos inorgánicos (fosfato en roca y sulfatos de zinc y hierro). Se formaron hileras de 2 toneladas de material, de 4.5 m. de longitud, 1.5 m. en la base y 1.5 m. de alto. Las hileras se voltearon con máquina de 6 a 8 veces en toda la prueba.

La presencia de una fase termofílica al inicio del proceso es una característica de la degradación biológica de materia orgánica en un ambiente aeróbico. En esta fase predomina la acción de microorganismos capaces de reproducirse bajo esas condiciones y la calidad final del compost depende en parte de lo que ocurre en dicho periodo. En las pruebas realizadas la temperatura del material de las hileras estuvo >50 °C durante el tiempo de volteo, llegando a temperaturas máximas de 74-77 °C. Las comparaciones con los resultados de otros investigadores se detallan en el Cuadro 5. Puede observarse que en los ensayos con menos material inicial el período termofílico duró menos tiempo y la temperatura máxima alcanzada fue generalmente menor en relación con aquellos ensayos llevados a cabo con una mayor cantidad de material inicial. Este hecho previamente conocido, es atribuido al aumento de escala (relación area/volumen) y la transferencia de calor hacia el medio ambiente .

Cuadro 5

Características de la fase termofílica

Referencia	Temperatura máxima °C	Período termofílico (>50 °C)
Este trabajo	70-77	60 días de 120
(Sánchez, Olguin et al. 1999)	67	27 días de 50
(Meunchang, Panichsakpatana et al. 2005)	54	15 días de 90
(Satisa and Devarajan 2007)	68	95 días de 120

Como resultado de la transformación de la materia orgánica durante el proceso, causada por la acción de los microorganismos, una fracción del carbono y del nitrógeno presente inicialmente se escapa al ambiente en forma gaseosa. La mayor parte del carbono lo hace como CO₂, sin embargo también hay desprendimiento de CH₄ (Jäckel, Thummes et al. 2005; Pattey, Trzcinski et al. 2005; Cabanas-Vargas & Stentiford 2006; Manios, Maniadakis et al. 2007). Habrá más producción de metano en aquellas situaciones en donde haya escasez de oxígeno en la hilera. Como se mencionó con anterioridad, la mayoría del nitrógeno que se escapa a la atmósfera lo hace en forma de amoníaco (NH₃), o en forma de óxidos de nitrógeno (N₂O) resultantes de la nitrificación del ion amonio (Raviv, Medina et al. 2004; Thompson, Wagner-Riddle et al. 2004; Chou & Büyüksonmez 2006; Pagans, Barrena et al. 2006). Desde el punto de vista del proceso y del costo del producto, mientras menor sea la pérdida de carbono más rentable es la operación. Es decir el rendimiento de producto final por unidad de peso de materias primas en la mezcla se maximiza. Los resultados de las estimaciones del rendimiento en términos de carbono perdido en los ensayos reportados se encuentran en el Cuadro 6. Los valores del carbono perdido fueron relativamente altos comparados con datos de la literatura, en los cuales se emplearon materiales similares o parecidos, y técnicas de producción iguales. Esto indica que la materia orgánica originalmente presente en las mezclas preparadas en los diferentes ensayos era de una naturaleza fácilmente transformada por la acción microbiana. Sin duda, la frecuencia del volteo ayudó en los cambios, proveyendo oxígeno para una actividad microbiana sostenida y efectiva. Se han comentado y resumido (Sánchez 2007) los resultados de Komilis y Ham (2006) relacionados con la pérdida de carbono (cuantificado por la medición acumulativa del CO₂ desprendido) durante el proceso, para mezclas de materias primas de diferente naturaleza. El autor resalta las pérdidas altas (74%) que se obtienen con materiales como desechos de comida, y por el contrario, las pérdidas bajas (20-30%) con materiales que contienen lignocelulosa, tal como el papel de desecho y las podas de ramas de los árboles.

Cuadro 6

Comparaciones de las estimaciones del carbono perdido en pruebas con materias primas similares y también con materias primas diferentes

Referencia	Carbono perdido, % del original
Este trabajo	60 a 80 %
(Meunchang, Panichsakpatana et al. 2005)	39-50
(Paredes, Bernal et al. 2002)	65 ³
(Fontanive, Efron et al. 2004)	35-45 ⁴
(Michel, Pecchia et al. 2004)	45-79 ⁵
(Saletes, Siregar et al. 2004)	40-50 ⁶ (peso seco)

Por otro lado, mientras menor sea la pérdida de nitrógeno, la calidad del producto, desde el punto de vista de su valor fertilizante aumenta (siempre y cuando el nitrógeno se encuentre disponible para sostener el desarrollo de las plantas (Gale, Sullivan et al. 2006). Los resultados de las estimaciones del nitrógeno perdido en los tres ensayos reportados se encuentran en el Cuadro 7.

Cuadro 7

Comparaciones de las estimaciones del nitrógeno perdido en pruebas con materias primas similares y también con materias primas diferentes

Referencia	Nitrógeno perdido, % del original
Este trabajo	40-70
(Meunchang, Panichsakpatana et al. 2005)	12-14
(Paredes, Bernal et al. 2002)	15.4-31.8
(Michel, Pecchia et al. 2004)	7-43
(Saletes, Siregar et al. 2004)	17-30

³ Compost preparado de una mezcla de lodos de la industria de extracción de aceite de oliva, mezclados, ya sea con residuos del procesamiento del algodón, o con tallos de maíz. Procesado en lotes de 2 a 4 toneladas de materia prima en hileras trapezoidales (1.5 m. de alto y una base de 2 por 3 m.), estáticas con aire forzado intermitentemente por un total de 92-182 días.

⁴ Compost preparado de una mezcla compleja de residuos de poda de varias especies de árboles, grama, hojas, estiércol de caballo, paja de trigo, gallinaza y cascabillo de arroz. Procesado en hileras de 1.5 m. de alto, 2.5 m. de ancho y 7.0 m. de largo, volteadas una vez a la semana por 126 días.

⁵ Compost preparado de una mezcla de estiércol de ganado lechero, paja de trigo y aserrín de maderas duras. Procesado en hileras de 11 a 28 m. de largo, 2.9 a 3.5 m. de ancho y 1.2 m. de alto, volteadas mecánicamente dos veces la primera semana y luego una vez a la semana, por 142 días.

⁶ Compost preparado de residuo sólido de la extracción de aceite de palma. Procesado en hileras trapezoidales de 5 toneladas (1.5 m. de alto y una base de 2.5 por 5 m.), volteadas mecánicamente una vez a la semana (4 pasos en cada hilera).

Meunchang et al (2005) reportaron que el contenido inicial de amoníaco era alto en la cachaza y en la mezcla de cachaza y bagazo. Este disminuyó continuamente durante el proceso. Por otro lado, el nitrógeno en forma de nitratos, el cual fue bajo al inicio del proceso, empezó a incrementarse entre los 60 a los 90 días. Como se aprecia en el Cuadro 7, estos investigadores reportaron pérdidas de nitrógeno más bajas que las encontradas en este trabajo. Sin embargo, estos datos contrastan con los reportados por Satisha & Devarajan (2007) en los cuales las concentraciones de amoníaco y nitratos, así como los perfiles de cambio, eran diferentes a lo largo del proceso. Lo anterior demuestra que tanto los patrones de cambio, como la cantidad de nitrógeno perdido, pueden variar bajo diferentes sistemas de producción.

La estimación de la madurez del compost por medio de ensayos biológicos empleando tomate y frijol fue exitosa, tanto en las pruebas de germinación, como las de crecimiento inicial en macetas colocadas en un invernadero. Meunchang et al. (2005) reportan datos de germinación de semillas de tomate y repollo chino aceptables con compost a los 90 días de procesamiento. Satisha & Devarajan (2007) emplearon la prueba con semillas de rábano para comprobar no solo madurez sino que ausencia de fitotoxicidad. Se encontró que a los 90 días de proceso la fitotoxicidad había disminuído considerablemente, pero la germinación mejoró todavía más con producto de 120 días de proceso.

El efecto negativo de la pulpa de café en los resultados de la germinación de semillas de maíz y frijol en un lecho de un 100 % de compost, podría explicarse por la mayor concentración de sales solubles en las mezclas que la contenían. Las mezclas 2-CP y 3-CPG tenían 3.2 veces más sales solubles que el resto. La influencia de dicho efecto disminuyó al mezclar el compost con suelo como se demostró con las pruebas de crecimiento de frijol y tomate en macetas. Meunchang et al. (2006) reportaron los resultados del crecimiento de tomate en invernadero con mezclas de compost y suelo. El peso de las raíces de las plantas prácticamente se duplicó con la adición de compost comparado con el control empleando fertilizante inorgánico.

Conclusiones

La cachaza mostró ser una excelente materia prima para convertirla en compost por medio de un volteo periódico del material colocado en hileras, con la adición simultanea de agua, con lo que se indujo, primero, una fase termofílica y luego, un periodo de temperatura descendente hasta que el producto se estabilizó. Se corroboró que la mezcla de la cachaza con 20 a 30 % de bagazo de caña, tal como lo recomendaban trabajos consultados en la literatura, era una mezcla apropiada para su conversión a compost. Se encontró que la pulpa de café podía adicionarse a la mezcla de cachaza y bagazo, preferiblemente en partes iguales. También podía agregarse gallinaza, preferiblemente en un rango de 10 a 20 % en la mezcla inicial, sin cambios en el proceso. El tiempo requerido para producir compost fue de

compost fue de aproximadamente 120 días (cuatro meses), en los cuales, 80 días, eran de un activo volteo y humidificación del material en las hileras. El resto del tiempo el material quedaba en reposo. El producto obtenido tenía un cociente C/N <25, frecuentemente entre 10 y 15, tenía un pH entre 7.3 y 8.7 y mantenía el índice del test Solvita® >6.0. El carbono y el nitrógeno perdidos fueron relativamente altos comparados con datos de la literatura. Siempre se perdió mas carbono que nitrógeno cuando ambos estaban expresados en términos del contenido inicial. Las pruebas biológicas de germinación de semillas y de crecimiento de plantas en invernadero establecieron de manera confiable la madurez del producto.

Finalmente debe decirse que a pesar de que una parte apreciable del nitrógeno se perdió en estos ensayos, posiblemente como emanaciones de NH₃, durante el proceso de manufactura de compost, es probable que dicha pérdida sea menor de la que sucede al mezclar la cachaza tal cual con suelo. Dicha aseveración está substantiada por el reciente trabajo de Chou y Büyüksönmez (2006) quienes encontraron mayores pérdidas en la descomposición natural de materiales lignocelulósicos, que en el proceso de elaborar compost de ellos. De manera que la práctica actual en Guatemala de mezclar la cachaza directamente con el suelo, pudiera no ser la mejor alternativa de aprovechar el nitrógeno que contiene..

Agradecimiento

El presente trabajo de investigación formó parte del proyecto de investigación de la línea de financiamiento FODECYT 01-2006 otorgado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, SENACYT. Las instalaciones en PROESUR y el equipo asociado se adquirió a través de un subcontrato con *The Texas Agricultural Experimental Station of the Texas A&M University System, EEUU*.

Bibliografía

- Adani, F., Genevini, P. et al. (2006) *Compost effect on soil humic acid: A NMR study* Chemosphere 65: 1414–1418
- Adani, F., Ubbiali, C. et al. (2006) *The determination of biological stability of composts using the Dynamic Respiration Index: The results of experience after two years* Waste Management 26: 41-48
- Alburquerque, J. A., Gonzalez, J. et al. (2006) *Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system* Chemosphere 64: 470–477
- Brewer, L. J. & Sullivan, D. M. (2003) *Maturity and stability evaluation of composted yard trimmings* Compost Science & Utilization 11 (2): 96-112
- Cabanas-Vargas, D. D. & Stentiford, E. I. (2006) *Oxygen and CO Profiles and Methane Formation During the Maturation Phase of Composting* Compost Science & Utilization 14 (2): 86-89
- Castaldi, P., Alberti, G. et al. (2005) *Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity* Waste Management 25: 209–213
- Changa, C. M., Wang, P. et al. (2003) *Assessment of the reliability of a commercial maturity test kit for composted manures* Compost Science & Utilization 11 (2): 125-143
- Chikae, M., Ikeda, R. et al. (2006) *Estimation of maturity of compost from food wastes and agro-residues by multiple regression analysis* Bioresource Technology 97: 1979-1985
- Chou, C.H. & Büyüksönmez, F. (2006) *Biogenic emissions from green waste and comparison to the emissions resulting from composting (Part 1: ammonia)* Compost Science & Utilization 14 (1): 16-22
- Criner, G. K., T. G. Allen, et al. (2001) *Compost economics: production and utilization in agriculture* Compost utilization in horticultural cropping systems In: Stoffella, P.J. & Kahn, B.A. (eds) Lewis Publishers: 241-260
- Day, M. & Shaw, K. (2001) *Biological, Chemical and Physical processes of composting* In: Stoffella, P.J. & Kahn, B.A. (eds) Compost utilization in horticultural cropping systems Lewis Publishers: 17-50
- Domeizel, M., Khalil, A. et al. (2004) *UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost* Bioresource Technology 94: 177–184
- Emino, E. R. & Warman, P. R. (2004) *Biological assay for compost quality* Compost Science & Utilization 12 (4): 342-348
- Fontanive, V., Efron, D. et al. (2004) *Evaluation of parameters during cocomposting of two contrasting raw materials* Compost Science & Utilization 12 (3): 268-272
- Gale, E. S., Sullivan, D. M. et al. (2006) *Estimating Plant-Available Nitrogen Release from Manures, Composts, and Specialty Products* J. Environ. Qual. 35: 2321-2332
- Jäckel, U., Thummes, K. et al. (2005) *Thermophilic methane production and oxidation in compost* FEMS Microbiology Ecology 52: 175-184

- Komilis, D. P. & Ham, R. K. (2006) *Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste* Waste Management 26: 62-70
- Manios, T., Maniadaakis, K. et al. (2007) *Methane and carbon dioxide emission in a two-phase olive oil mill sludge windrow pile during composting* Waste Management 27: 1092-1098
- Matteson, T. L. & Sullivan, D. M. (2006) *Stability Evaluation of Mixed Food Waste Composts* Compost Science & Utilization 14 (3): 170-177
- Meunchang, S., Panichsakpatana, S. et al. (2005) *Co-composting of filter cake and bagasse; byproducts from a sugar mill* Bioresour Technol 96 (4): 437-442
- Meunchang, S., Panichsakpatana, S. & Weaver, R.W. (2006) *Tomato growth in soil amended with sugar mill by-products compost* Plant & Soil 280: 171-176
- Michel, F. C., Pecchia, J. A. et al. (2004) *Mass and nutrient loss during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw* Compost Science & Utilization 12 (4): 323-334
- Pagans, E., Barrena, R. et al. (2006) *Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature* Chemosphere 62: 1534-1542
- Paredes, C., Bernal, M. P. et al. (2002) *Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes* Bioresource Technology 85: 1-8
- Pattey, E., Trzcinski, M. K. et al. (2005) *Quantifying the reduction of greenhouse gas emissions as a result of composting dairy and beef cattle manure* Nutrient Cycling in Agroecosystems 72: 173-187
- Pedro, M. S., Haruta, S. et al. (2003) *Isolation and characterization of predominant microorganisms during decomposition of waste materials in a field-scale composter* J. Bioscience Bioeng. 95 (4): 368-373
- Raviv, M., Medina, S. et al. (2004) *Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture* Compost Science & Utilization 12 (1): 6-10
- Richard, T. L. & Walker, L. P. (2006) *Modeling the temperature kinetics of aerobic solid-state biodegradation* Biotechnol. Prog. 22 (1): 70-77
- Rolz, C. (2006) *Producción y características del compost elaborado de residuos orgánicos provenientes de actividades agrícolas* Revista de la Universidad del Valle No. 15, 100-117
- Rynk, R. & Richard, T.L. (2001) *Commercial compost production systems* In: Stoffella, P.J. & Kahn, B.A. (eds) *Compost utilization in horticultural cropping systems* Lewis Publishers: 51-93
- Saletes, S., F. A. Siregar, et al. (2004) *Lignocellulose composting: case study on monitoring oil palm residuals* Compost Science & Utilization 12 (4): 372-382
- Sanchez, A. (2007) *A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions* Waste Management 27: 854-855
- Sánchez, G., Olguin, E. J. et al. (1999) *Accelerated coffee pulp composting* Biodegradation 10 (1): 35-41

- Satisha, G. C. & Devarajan, L. (2007) *Effect of amendments on windrow composting of sugar industry pressmud* Waste Management 27: 1083-1091
- Scaglia, B., Erriquens, F. G. et al. (2007) *Precision determination for the specific oxygen uptake rate (SOUR) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products* Bioresource Technology 98: 706-713
- Stentiford, E. I. & Dodds, C. M. (1992). *Composting* In: Doelle, H. W., Mitchell, D. A. & Rolz, C. E. *Solid Substrate Cultivation* Elsevier Applied Science: 211-246
- Suarez-Estrella, F., Vargas-Garcia, M. C. et al. (2007) *Effect of horticultural waste composting on infected plant residues with pathogenic bacteria and fungi: Integrated and localized sanitation* Waste Management 27: 886-892
- Sullivan, D. M. & Miller, R.O. (2001) *Compost quality attributes, measurements and variability* Compost utilization in horticultural cropping systems In: Stoffella, P.J. & Kahn, B.A. (eds) Lewis publishers: 95-134
- Sundberg, C. & Jonson, H. (2005) *Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste - influence of starting culture* Biodegradation 16: 205-213
- Tiquia, S. M. (2005) *Microbiological parameters as indicators of compost maturity* Journal of Applied Microbiology 99: 816-828
- Thompson, A. G., Wagner-Riddle, C. et al. (2004) *Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure* Environmental Monitoring and Assessment 91: 87-104
- Vinneras, B. (2007) *Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure* Bioresource Technology 98: 3317-3321
- Warman, P. R. (1999) *Evaluation of seed germination and growth tests for assessing compost maturity* Compost Science & Utilization 7 (3): 33-37
- Wu, L. & Ma, L. Q. (2002) *Relationship between Compost Stability and Extractable Organic Carbon* J. Environ. Qual. 31: 1323-1328
- Zvomuya, F., Larney, F. J. et al. (2005) *Chemical and Physical Changes Following Co-Composting of Beef Cattle Feedlot Manure with Phosphogypsum* J Environ Qual 34 (6): 2318-2327



(De izquierda a derecha)

Dr. Rolando Cifuentes,

M.Sc. Carlos E. Rolz Asturias,

Ing. Carlos A. Porres,

M.Sc. Luis Roberto de León Fajardo

Carlos Rolz

<crolz@uvg.edu.gt>

Decano del Instituto de Investigaciones de la UVG

Luis Roberto de León

<ldeleon@uvg.edu.gt>

Investigador del Laboratorio de Ingeniería Bioquímica del Centro de Investigaciones de Ingeniería del Instituto de Investigaciones de la UVG

Dr. Rolando Cifuentes

<rcifuen@uvg.edu.gt>

Director del Centro de Estudios Agrícolas y Forestales del Instituto de Investigaciones de la UVG

Ing. Carlos Alberto Porres Ortega

<caporres@intelnet.net.gt>

Consultor