

UTILIZACIÓN DE SUPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA. PARTE 7. COMPOSTAJE DE BAGAZO DE AGAVE Y VINAZAS TEQUILERAS

Gilberto IÑIGUEZ¹, Nalleli ACOSTA¹, Liliana MARTINEZ¹, Javier PARRA² y Orfil GONZÁLEZ³

¹Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 52-93. Guadalajara 45020 Jalisco

²Universidad de Guadalajara, Departamento de Química,

³Universidad de Guadalajara Departamento de Ingeniería Química. Blvd. Marcelino García Barragán y Calzada Olímpica. Guadalajara 44480 Jalisco, México

(Recibido enero 2004, aceptado diciembre 2004)

Palabras clave: bagazo de agave, vinazas tequileras, biodegradación, compostaje

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio de compostaje de bagazo de agave para estudiar su proceso de degradación. Para esto se pusieron en compostaje 8 pilas de bagazo bajo un sistema experimental de cuatro tratamientos con dos repeticiones por tratamiento. El primero consistió de bagazo regado con agua de la llave, el segundo de bagazo regado con vinazas, el tercero de bagazo con urea regado con agua de la llave y el cuarto de bagazo con urea regado con vinazas. Al formarse las pilas se colocaron en cada una de ellas, a diferentes niveles, 5 sensores de temperatura. El promedio de los cambios de temperatura se graficó para cada día. Cada dos meses, al remover las pilas para facilitar la aireación y la adición de agua y/o vinazas se tomaron muestras para el análisis de pH, materia orgánica y celulosa. Al final del tiempo de compostaje el material de las pilas (composta) fue sujeto a un análisis de cenizas, carbono orgánico total, nitrógeno, P, K y conductividad. Además las compostas también fueron sujetas a estudios de madurez y fitotoxicidad mediante el análisis de brote de semillas, crecimiento relativo, germinación *in vitro*, elongación de la raíz y prueba de "Solvita". La degradación de materia orgánica (MO) y de la celulosa para los tratamientos 1 y 2 siguió una ecuación cinética de primer orden mientras que para los tratamientos 3 y 4 la degradación siguió una ecuación cinética de orden mixto. El período de compostaje para los tratamientos 1 y 2 fue de 242 días, habiendo logrado pérdidas de materia seca de 52.8 y 59.1 % respectivamente. Para los tratamientos 3 y 4 el tiempo de compostaje fue de 208 y 228 días, respectivamente, con pérdidas de materia seca de 56.7 y 63.7 % respectivamente. En las pruebas de fitotoxicidad ninguna de las cuatro compostas provocó problemas de crecimiento ni de germinación de semillas.

Key words: agave bagasse, vinasses, biodegradation, composting

ABSTRACT

In this research work the degradation process of agave bagasse was studied. For this, eight agave bagasse piles were prepared using four different treatments with two repli-

cates per treatment. Treatment 1 consisted of agave bagasse wetted with tap water; treatment 2, agave bagasse wetted with vinasses; treatment 3, agave bagasse with urea wetted with tap water; and treatment 4 agave bagasse with urea wetted with vinasses. While making the piles, five temperature sensors were placed at different heights. Temperature readings were averaged on a daily basis and reported for the composting period. Every two months, the piles were moved to facilitate aeration and the addition of water and/or vinasses. Samples were taken for the analysis of pH, organic matter and cellulose. At the end of the composting time, composts were subjected to analysis of ash, total organic carbon, N, P, K and conductivity. Composts were also subjected to qualitative bioassay to screen for the presence of phytotoxins using seedling emergence, relative growth, *in vitro* germination and root elongation. For treatments 1 and 2 the organic matter (OM) and cellulose degradation followed a first order reaction with respect to time. Treatments 3 and 4 showed the evolution of OM and cellulose degradation following a mixed order reaction. The composting time for treatments 1 and 2 was 142 days, having achieved a total loss of dry matter of about 52.8 % and 59.1 % respectively. For treatments 3 and 4, the composting time was 208 and 228 days, with a total loss of dry matter of about 56.7 % and 63.7 %, respectively. Composts from the four treatments had no adverse effects on seedling emergence, relative growth, *in vitro* germination and root elongation of cucumber seeds.

INTRODUCCIÓN

Es mundialmente conocida la importancia que tiene la industria del tequila en México, principalmente en el estado de Jalisco. Su desarrollo industrial ha ido en crecimiento desde hace tiempo con dos importantes problemas que resolver, las aguas residuales llamadas vinazas, producto de la destilación del tequila y el volumen de bagazo de agave, producto de la extracción de los azúcares fermentables de las cabezas de la planta *Agave tequilana* Weber azul. Según Cedeño (1995) la producción de bagazo de agave es equivalente al 40 % del peso de las cabezas de agave molidas y si se considera que en el año 2002 se molieron 413,900 toneladas de agave se concluye que en sólo ese año se dejaron de aprovechar 165,560 toneladas de bagazo (CRT 2002). Tradicionalmente el bagazo de agave ha sido utilizado para la fabricación de ladrillos y colchones, pero para los grandes volúmenes que se generan este aprovechamiento no representa un impacto importante en la utilización de este material. También según Cedeño (1995), una fábrica típica de tequila produce de 7 a 10 L de vinazas por litro de tequila a 100 °G.L. Con base en esta referencia, resulta que en el año 2002 las fábricas de tequila que produjeron tequila con 100 % de agave, generaron alrededor de 290 millones de litros de vinazas (CRT 2002). Esta aguas residuales con un pH menor a 3.9 y una demanda biológica de oxígeno de 25 a 60 g L⁻¹, representan para la industria del tequila un problema grave de tratamiento, cuya solución se ha intentado con varios procedimientos, desde lagunas de estabilización hasta

reactores aerobios y anaerobios, pero lo cierto es que todavía el problema no se soluciona de manera definitiva, por lo que generalmente o se tiran las vinazas en algún arroyo o se aplican a suelos agrícolas con los riesgos que esto implica. El proceso de compostaje puede representar una forma útil y provechosa para el manejo y disposición final del bagazo de agave, ya que en experiencias previas el bagazo ha demostrado ser un elemento valioso para la degradación de tripas de cerdo y material de descarte de la industria de curtiduría (Íñiguez *et al.* 2003a,b). En el compostaje de tripas de cerdo a escala comercial se ha reemplazado el agua de la llave por vinazas sin daño aparente al proceso.

El compostaje, conocido en inglés como “compost” (sustantivo que proviene del latín *compositus* y que significa mezcla para fertilizar o renovar la tierra), es comúnmente utilizado para reciclar materiales orgánicos y mantener la fertilidad de los suelos (Anónimo 1993, Maynard 1994, Golueke y Díaz 1996, Abdelhaimid, *et al.* 2004). Es un proceso biológico aerobio que aprovecha los microorganismos presentes en el mismo material que se va a procesar, para convertir el material orgánico biodegradable en un producto útil para la agricultura (Bertran *et al.* 2004), además de que este proceso puede servir para eliminar efectos fitotóxicos de residuos agroindustriales (Ioanna *et al.* 2003, Simone y Barry 2003). El objetivo del presente trabajo fue estudiar el proceso de degradación del bagazo de agave sin la adición de nutrientes, agregando urea y/o añadiendo vinazas, así como evaluar algunos efectos de fitotoxicidad en las pilas a las que se les añadió vinazas.

La pérdida de sustrato durante el compostaje comúnmente se considera como una reacción de primer orden, esto es, la que tiene lugar a velocidad directamente proporcional a la concentración del sustrato. Para este caso la velocidad de reacción en cualquier tiempo t está dada por:

$$-\frac{dS}{dt} = k_1 S \quad (1)$$

en la que S es la concentración del sustrato (kg de sustrato/kg de muestra inicial), $-dS/dt$ es la velocidad a la que disminuye S con relación al tiempo y k_1 es la constante de proporcionalidad de reacción (t^{-1}). Integrando la ecuación (1) se obtiene la ecuación que describe el comportamiento descendente de S durante el compostaje:

$$S = S_0 e^{-k_1 t} \quad (2)$$

en donde S_0 es la concentración inicial de sustrato (kg de sustrato inicial/ kg de muestra inicial).

Reacomodando algebraicamente la ecuación (2), la evolución de S se puede expresar en función de la relación $(S_0 - S)/S_0$, denotada por PS y que aquí se denominará *proporción de pérdida de S*:

$$PS = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - \frac{S}{S_0} = 1 - e^{-k_1 t} \quad (3)$$

con la cual se describe el comportamiento ascendente de la variable PS , correspondiente a la cinética de primer orden de degradación de S . En términos de PS , la ecuación diferencial (1) se expresa como:

$$\frac{dPS}{dt} = k_1 (1 - PS) \quad (4)$$

Se ha visto que la ecuación (3) se ajusta muy bien para describir la descomposición de algunos sustratos en compostaje en experimentos controlados de laboratorio (Haug 1993). Sin embargo, bajo ciertas circunstancias la descomposición de sustratos biodegradables se describe más apropiadamente mediante la función sigmoideal:

$$PS = \frac{k_1 / k_2}{1 + e^{a - k_1 t}} \quad (5)$$

cuya ecuación diferencial correspondiente es:

$$\frac{dPS}{dt} k_1 PS - k_2 PS^2 \quad (6)$$

Como puede observarse de la ecuación (6), la velocidad de cambio de la variable PS presenta una cinética de orden mixto: un término de incremento de primer orden cuya constante de proporcionalidad es k_1 (t^{-1}) y un término de decremento de segundo orden cuya constante de proporcionalidad es k_2 (t^{-1}).

Derivando la ecuación (6) e igualando a cero, se encuentra que en $PS = k_1/2k_2$ el valor máximo de

dPS/dt se obtiene justamente en:

$$t = \frac{a}{k_1} \quad (7)$$

Por otra parte, haciendo que:

$$K = \frac{k_1}{k_2} \quad (8)$$

la ecuación (6) se puede expresar en la forma:

$$\frac{dPS}{dt} = \frac{k_1 PS}{K} (K - PS) \quad (9)$$

que corresponde a la ecuación clásica del modelo logístico de crecimiento poblacional:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{rN}{K} (K - N) \quad (10)$$

cuya solución es:

$$Nt = \frac{K}{1 + e^{a - rt}} \quad (11)$$

Donde:

Nt = el número de individuos en un tiempo t

K = la capacidad de carga del ambiente

r = el índice intrínseco de crecimiento natural

a = Factor proporcional al número inicial de individuos de la población (N_0):

$$e^a = \frac{K}{N_0} - 1 \quad (12)$$

La correspondencia entre las ecuaciones (9) y (10) es completamente normal si se considera que la variable PS es una función directa del número de microorganismos que llevan a cabo la degradación del sustrato. Obviamente, para la variable PS , la correspondiente e^a será:

$$e^a = \frac{k_1 / k_2}{PS_0} - 1 \quad (13)$$

con lo que se verifica en la ecuación (5) que a $t=0$, $PS = PS_0$.

En función de S , la ecuación (6) se transforma en:

$$-\frac{dS}{dt} = K_0 + K_1 S - K_2 S^2 \quad (14)$$

en la cual: $K_0 = (k_1 - k_2)S_0$, $K_1 = 2k_2 - k_1$ y $K_2 = k_2/S_0$

La solución correspondiente a la ecuación (14) es:

$$S = S_0 \left[1 - \frac{k_1 / k_2}{1 + e^{a - k_1 t}} \right] \quad (15)$$

En este caso, se encuentra ahora un mínimo para dS/dt en $S = K_1/2K_2$, igualmente cuando $t = a/k_1$.

Pérdida de sustrato y cenizas

Experimentalmente, la pérdida de la materia or-

gánica durante el compostaje puede medirse indirectamente a través de la fracción de cenizas, calculando PS mediante la ecuación:

$$PS = 1 - \frac{(100 - X)X_0}{(100 - X_0)X} \quad (16)$$

en la cual X_0 representa el porcentaje inicial de cenizas y X el porcentaje de cenizas en cualquier punto del muestreo a lo largo del compostaje.

Se puede deducir la ecuación (16) considerando que en un experimento hipotético “no destructor”, en una misma porción de composta deshidratada se le da seguimiento a la materia orgánica mediante sus cenizas. Esto es, en $t = 0$, sea M_0 la masa total inicial de materia seca, y sea M la masa total de materia seca en cualquier punto de muestreo en el que $t > 0$. Por su parte, sea m la masa de cenizas, que debe ser constante en cualquier tiempo, dada la hipótesis del experimento. Finalmente, sea A_0 la masa inicial de sustrato y sea A la masa de sustrato en cualquier punto del muestreo. En consecuencia:

$$A_0 = M_0 - m_0 \quad (17)$$

$$A = M - m \quad (18)$$

Con base en estas definiciones, las concentraciones de sustrato y la proporción de pérdida de sustrato, estarán dadas por:

$$S_0 = \frac{A_0}{M_0} \quad (19)$$

$$S = \frac{A}{M} \quad (20)$$

$$PS = 1 - \frac{S}{S_0} = 1 - \frac{M - m}{M_0 - m_0} \quad (21)$$

Por su parte, los porcentajes de cenizas quedan dados por:

$$X_0 = \frac{m_0}{M_0} \times 100 \quad (22)$$

$$X = \frac{m}{M} \times 100 \quad (23)$$

Considerando que $m_0 = m$ según nuestro hipotético experimento, el reacomodo algebraico de la ecuación (21) combinado con las ecuaciones (22) y (23) la convierte en:

$$PS = 1 - \frac{\frac{X_0}{100 - X_0}}{\frac{X}{100 - X}} \quad (24)$$

de donde se obtiene la ecuación (16).

Análogamente, si durante el compostaje se

monitorea la evolución de una fracción del sustrato, por ejemplo celulosa, la pérdida de este sustrato específico también puede seguirse mediante la fracción de cenizas de acuerdo a la ecuación:

$$PS = 1 - \frac{YX_0}{Y_0X} \quad (25)$$

en donde Y_0 es el porcentaje inicial de celulosa e Y el porcentaje de celulosa en cualquier punto de muestreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente trabajo se utilizó bagazo de agave proporcionado por una fábrica de tequila que no realiza, como normalmente se hace, el cocimiento de las cabezas de agave antes de la extracción de los azúcares fermentables, sino que estos son extraídos con agua caliente de cabezas de agave previamente desgarradas para facilitar la extracción. Las vinazas (pH 3.35, sólidos sedimentables 333 mL L⁻¹, sólidos suspendidos totales 3,400 mg L⁻¹, conductividad 1,955 μmhos cm⁻¹, demanda química de oxígeno 52,628 mg L⁻¹, temperatura 80 °C) fueron proporcionadas por una fábrica de tequila que sigue el método tradicional de cocción de las cabezas de agave y extracción de los azúcares fermentables. Se pusieron en proceso de compostaje 8 pilas de bagazo de agave bajo un sistema experimental de cuatro tratamientos con dos repeticiones por tratamiento. El tratamiento 1 consistió de dos pilas de bagazo de agave (Pila 1: 5,350 kg, Pila 2: 6,250 kg) que se regaron con agua de la llave. El tratamiento 2 consistió de dos pilas de bagazo (Pila 3: 7,300 kg, Pila 4: 7,140 kg) que se regaron con vinazas. Los tratamientos 3 y 4 consistieron también de pilas de bagazo de agave sólo que al inicio del proceso se añadió urea para ajustar la relación C:N del bagazo a 25:1. Las pilas del tratamiento 3 (Pila 5: 5,220 kg, Pila 6: 6,550 kg) se regaron con agua de la llave, mientras que las pilas del tratamiento 4 (Pila 7: 5,520 kg, Pila 8: 5,340 kg) con vinazas. Al irse formando las pilas se colocaron en cada una de ellas a diferentes niveles, 5 sensores de temperatura. El promedio de los cambios de temperatura de los 5 sensores se graficó para cada día. Periódicamente las pilas se removieron para facilitar la aireación y la adición de vinazas o agua según el caso, para mantener la humedad de las pilas entre 40 y 60 % de humedad. El tiempo de compostaje para las pilas del tratamiento 1 y 2 fue de 242 días (8 meses), mientras que para el tratamiento 3 y 4 fue 208 días (7 meses) y 228 días

(7.6 meses), respectivamente. Cada dos meses al estar mezclando las pilas, se tomaron muestras compuestas de cada una de las pilas. Para esto se seleccionaron al azar seis sitios a lo largo y ancho de las pilas. En cada sitio de toma de muestras se hizo un corte logitudinal y de la parte de arriba, en medio y abajo de las pilas se colectaron tres submuestras de 3 litros cada una y se mezclaron en una bolsa de plástico. Las 6 mezclas compuestas de los sitios de muestreo se mezclaron en otra bolsa de plástico para tener un volumen total de 54 litros. De esta muestra, mezclándola y tomando submuestras de medio litro cada una se obtuvo una muestra final compuesta de 3 litros (Leege y Thompson 1997), de donde se tomó una muestra para la determinación de humedad. El resto se secó a 55 °C, se molió y guardó en frascos de vidrio para el análisis químico posterior de pH, cenizas, materia orgánica y contenido de celulosa. Al final del tiempo de compostaje el material de las pilas fue sujeto a un análisis de los parámetros anteriores más carbono orgánico total, nitrógeno total Kjeldahl, conductividad, K y P.

Análisis químico

El contenido de nitrógeno total (NTK) fue determinado por el procedimiento macroKjeldahl (AOAC 1984). El contenido de humedad o materia seca fue determinado secando 2 g de muestra por 24 h a 105 °C. Para determinar las cenizas, esta misma muestra se puso en una mufla a 550 °C por 2 h. El material volátil fue considerado como materia orgánica (AOAC 1984). El pH y la conductividad de las muestras fueron determinados de extractos en agua en una relación peso/volumen de 1:5 (<http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>). El carbono orgánico total (COT) fue calculado mediante la siguiente ecuación (Golueke 1977):

$$\% \text{ COT} = (100 - \% \text{ cenizas}) / 1.8$$

La relación C:N fue calculada con base en los análisis anterior de carbono y el de NTK.

Las determinaciones de celulosa y hemicelulosa de las muestras fueron realizadas mediante los análisis de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) (Georing y Van Soest 1970). En el FDN las muestras se hierven en una solución neutra, luego se filtran, secan y pesan (el material disuelto corresponde a lípidos, azúcares, ácidos orgánicos, material soluble en agua, pectinas, almidones, nitrógeno soluble y no protéico). El material insoluble remanente corresponde a la FDN de la muestra (hemicelulosa, proteína, proteína unida a la fibra, celulosa, lignina y nitrógeno lignificado). En el FDA las

muestras se hierven en una solución ácida (0.5 molar de ácido sulfúrico). El material insoluble remanente después de la filtración y el secado corresponde a la FDA de la muestra. Este material insoluble se trata luego con H₂SO₄ al 72 %, se filtra, se lava con agua caliente, se seca y se pesa. La diferencia entre el material que queda antes y después del tratamiento ácido es la celulosa, que se expresa como porcentaje de materia seca. El contenido de hemicelulosa de las muestras se calculó como la diferencia entre FDA y FDN.

El total de P y K de las muestras de composta fue determinado mediante la técnica de espectrometría de emisión por plasma (ICP) en muestras previamente digeridas en ácidos nítrico y clorhídrico. Los análisis se practicaron por triplicado.

La proporción de pérdida de materia orgánica (MO) por la mineralización durante el proceso de compostaje, fue calculada de acuerdo con la siguiente ecuación, descrita en la sección de cinética de degradación (ecuación 16 multiplicada por 100):

$$\text{Pérdida de MO (\%)} = 100 - \frac{(100 - X)X_0}{(100 - X_0)X}(100)$$

en la cual X_0 representa el porcentaje inicial de cenizas y X el porcentaje de cenizas en cualquier momento de la toma de muestra en el tiempo de compostaje. La ecuación ha sido aplicada previamente por García *et al.* (2003) y Paredes *et al.* (2001), en estudios de compostaje de desechos orgánicos con aguas residuales de fábricas de aceite de olivo.

La proporción de pérdida de celulosa fue calculada de acuerdo con la siguiente ecuación, descrita también en la sección de cinética de degradación (ecuación 17 multiplicada por 100):

$$\text{Pérdida de celulosa (\%)} = 100 - \frac{YX_0}{Y_0X}(100)$$

en donde Y_0 es el porcentaje inicial de celulosa y Y el porcentaje de celulosa en cualquier momento de la toma de muestra. X_0 es el porcentaje inicial de cenizas y X el porcentaje de cenizas en cualquier momento de la toma de muestra en el tiempo de compostaje.

Pruebas biológicas

Brote de semillas y crecimiento relativo

A las compostas de bagazo de agave (tratamientos 1-4) se les realizó un análisis cualitativo para reconocer posibles problemas de fitotoxicidad. Para esto se utilizaron charolas de poliestireno (34 x 34 cm) con 100 celdas cada una (10 x 10). Cada charola, se llenó con cada una de las compostas, tres hile-

ras adyacentes, seguidas por tres de turba (utilizada como testigo) y otras tres de otra composta. También tres hileras adyacentes se llenaron con sólidos de vinazas para evaluar su comportamiento en el brote y crecimiento de semillas. En cada una de las celdas se colocaron dos semillas de pepino cubriéndolas con aproximadamente 1 cm de material. Cada charola se colocó dentro de una caja de plástico transparente para conservar la humedad. Las charolas permanecieron en el laboratorio expuestas a períodos de luz de 12 horas. Después de 14 días las charolas se sacaron de las cajas de plástico para contar y anotar el número de plantitas que mostraron plenamente el hipocotiledón con los cotiledones completamente expandidos. La evaluación del vigor y del crecimiento relativo fue realizada de acuerdo con el procedimiento (Método 05.05-A.) seguido por los TMECC (2001).

Germinación *in vitro* y elongación de la raíz

Los estudios de tasa de germinación relativa y elongación de la raíz se realizaron de acuerdo los procedimientos recomendados para el análisis de madurez de compostas (TMECC 2001), utilizando extractos solubles en agua de muestras de los cuatro tratamientos (extractos de dos pilas por tratamiento), así como del extracto de sólidos secos de vinazas. Los extractos se obtuvieron de muestras secas de composta en una relación de 2 a 1 agua desionizada: muestra seca. Tres ml de cada extracto se vertieron en cajas de Petri (una caja por muestra) provistas de papel filtro (Whatman No. 4). En el testigo se utilizaron tres cajas de Petri con tan sólo agua desionizada, en ellas se colocaron 10 semillas de pepino y se dejaron germinar a temperatura de laboratorio. El tiempo de germinación de las semillas se determinó cuando la germinaron en más del 50 %, esto sucedió a los dos días para el testigo y a los tres para las compostas. La medición de la elongación de la raíz se realizó a los 7 días de iniciada la germinación.

Prueba de “solvita”

La madurez de las compostas fue evaluada por la prueba de “solvita” (Woods End Research Laboratory 1999) que es un procedimiento nuevo y sencillo para determinar el índice de madurez de muestras de composta. Se basa en la medición simultánea y medición conjunta del amoníaco y del dióxido de carbono eliminado durante la respiración. El análisis “solvita” clasifica la madurez de la composta, según una escala de color que desarrollan dos paletas colocadas en la muestra de composta, del 1 al 5 para el amoníaco y de 1 al 8 para el CO₂.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el proceso de compostaje es bien conocida la importancia que representa la relación C:N para una buena biodegradación de materiales orgánicos (25-30:1) (Rynk 1992a). En el **cuadro III** puede apreciarse que la relación C:N del bagazo de agave fue de 95.5:1 por lo que al menos a dos tratamientos (tratamiento 3 y 4) se les ajustó esa relación a 25:1 mediante la adición de urea. Una relación C:N superior a los valores recomendados retrasa la descomposición de los materiales orgánicos y valores inferiores conducen a una excesiva pérdida de nitrógeno dando lugar a problemas de olores (Fraser y Lau 2000). Después de añadir urea a las pilas de los tratamientos 3 y 4, estas no se movieron en mes y medio para dar tiempo a que la enzima ureasa desdoblara la urea y formara NH₃ (Sundstøl y Coxworth 1984), para de esta forma favorecer el ataque microbiano mediante el pretratamiento del bagazo con NH₃. En Estados Unidos de América el uso de amoníaco es el método de tratamiento alcalino más ampliamente utilizado para aumentar la digestibilidad de residuos lignocelulósicos (Sundstøl y Coxworth 1984, Males 1987, Mason *et al.* 1988). Al tratamiento 1 no se le añadió urea con el objeto de estudiar el compostaje del bagazo de agave sin más nutrientes que los propios. Al tratamiento 2 tampoco se le añadió urea, dado que en este caso se quería estudiar el compostaje del bagazo de agave con los supuestos nutrientes y compuestos fitotóxicos de las vinazas al regar las pilas con estas aguas residuales.

Temperatura

Las **figuras 1-4** muestran los incrementos y decrementos de temperatura de las pilas 1 a 8 durante el compostaje. En estas figuras también se ilustran los días en que se movieron las pilas para facilitar la aireación y la adición de agua o vinazas según correspondiera. En la **figura 1** se muestra que las pilas 1 y 2 alcanzaron temperaturas máximas promedio de 73 y 74 °C, respectivamente, entre los días 74 y 90. En el compostaje de residuos agroindustriales no es raro alcanzar estas temperaturas, Bertran *et al.* (2004) sometieron a compostaje residuos de viñedos con lodos de una planta de tratamiento y llegaron a temperaturas de 74 °C a los 54 días de haber iniciado el compostaje. En la **figura 1** también puede apreciarse el día en que se movieron las pilas para facilitar la aireación y la adición de agua de la llave. En los primeros 42 días no fue necesaria la adición de agua, sino hasta el día 56 se adicionó agua por primera vez, a partir de esa fecha, cada vez que se

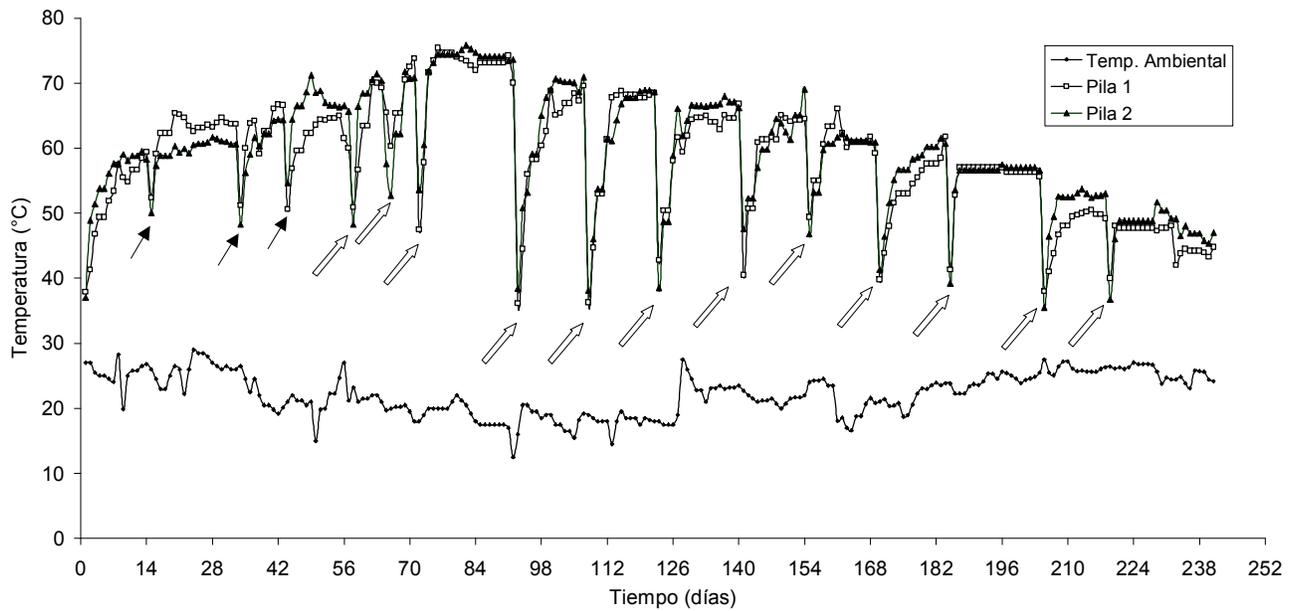


Fig. 1. Cambios de temperatura durante la biodegradación del bagazo de agave en el tratamiento 1. Las flechas delgadas indican los días de volteo y las flechas gruesas vacías los días de volteo y la adición de agua

removieron las pilas fue necesaria la adición suficiente de agua para conservar el contenido de agua entre 40 y 65 %, rango recomendado para lograr una biodegradación más rápida (Rynk 1992b). El tiempo de compostaje para las pilas 1 y 2 fue de 242 días

al bajar y estabilizarse la temperatura en un promedio de 45 °C en ambas pilas. Al final de este tiempo el producto del compostaje presentó olor, textura y color similares al de una tierra de jardinería.

En la **figura 2** se muestra que la pila 3 alcanzó

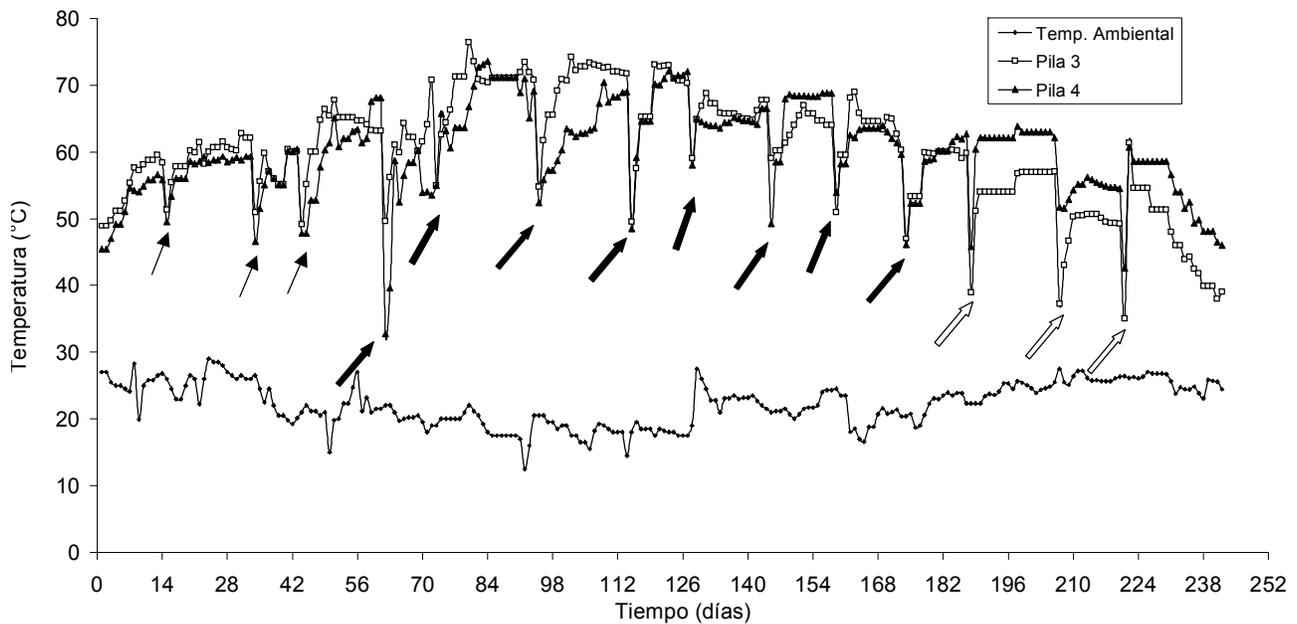


Fig. 2. Cambios de temperatura durante la biodegradación del bagazo de agave en el tratamiento 2. Las flechas delgadas indican los días de volteo, las flechas gruesas rellenas indican los días de volteo y la adición de vinazas y las flechas gruesas vacías los días de volteo y la adición de agua

temperaturas promedio superiores a los 70 °C entre los días 76 y 125 y la pila 4 temperaturas también superiores a los 70 °C entre los días 81 y 91 y entre los días 118 y 125. La adición de vinazas para ambas pilas fue desde el día 60 hasta el día 171, después de este se adicionó agua solamente para no estimular más el proceso de compostaje y permitir así la degradación completa de posibles compuestos remanentes xenobióticos fitotóxicos. A la pila 3 se le añadieron 2,920 litros de vinazas y a la pila 43,480 litros que considerando los kg de bagazo inicial da un promedio de 0.443 litros de vinazas por kg de bagazo. El tiempo de compostaje para estas dos pilas fue de 242 días al registrarse temperaturas máximas promedio de 39 °C para la pila 3 y de 45 °C para la pila 4. El producto del compostaje presentó olor, textura y color similares al de una tierra de jardinería.

La **figura 3** muestra las variaciones de temperatura que se registraron en el tratamiento 3 (pilas 5 y 6) durante 208 días de compostaje. La flecha delgada indica el día que se removieron por primera vez las pilas y las flechas gruesas vacías los días en que se removieron y se les adicionó agua de la llave. Las temperaturas máximas alcanzadas fueron alrededor de los 70 °C en los primeros dos meses y medio. El compostaje se consideró terminado para estas dos pilas a los 208 días de haber iniciado el tratamiento al registrarse temperaturas máximas promedio de 43

°C. Al final de este tiempo, el producto del compostaje presentó olor, textura y color similares al de una tierra de jardinería.

La **figura 4** muestra los cambios de temperatura en las pilas 7 y 8 (tratamiento 4). Desde el inicio del compostaje se registró un incremento constante de temperatura hasta alcanzar un máximo promedio de 70 °C en ambas pilas. La fecha delgada indica que a los 45 días de iniciado el compostaje se realizó el primer volteo. Las flechas rellenas indican los días de volteo y la adición de vinazas. La flecha vacía indica el día de volteo con adición de agua de la llave. En ocho ocasiones diferentes se añadieron en total 4,520 litros de vinazas a la pila 7 y 4,480 litros de vinazas a la pila 8 para dar en promedio para las dos pilas de 0.830 litros de vinazas por kg de bagazo húmedo. Para evitar un posible enriquecimiento y continuación del compostaje con una nueva adición de vinazas, a los 212 días de haber iniciado el compostaje, se decidió añadir agua de la llave a las pilas, con la finalidad de degradar solamente los compuestos remanentes xenobióticos de las vinazas de la última adición el día 189. El período de compostaje se consideró terminado a los 228 días al registrarse temperaturas promedio de 41 °C para la pila 7 y de 44 °C para la pila 8. Al final de este tiempo, el producto del compostaje presentó olor, textura y color similares a una tierra de jardinería.

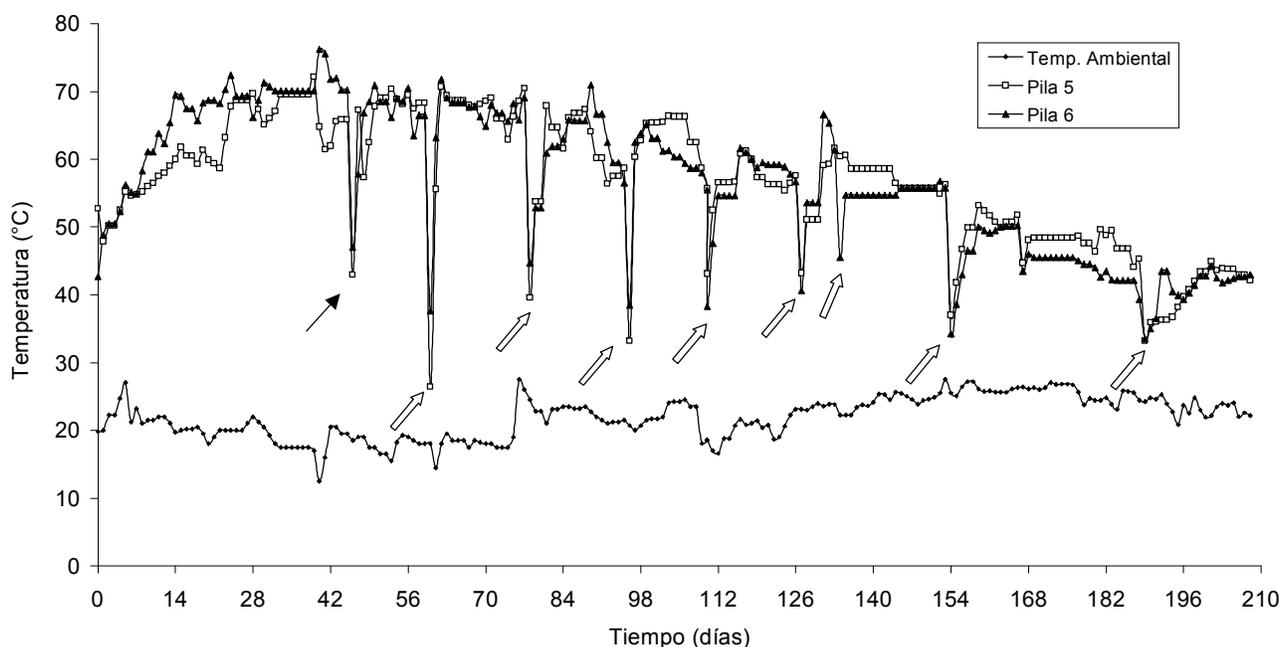


Fig. 3. Cambios de la temperatura durante la biodegradación del bagazo de agave en el tratamiento 3. Las flechas delgadas indican el día del primer volteo y las flechas gruesas vacías los días de volteo y la adición de agua

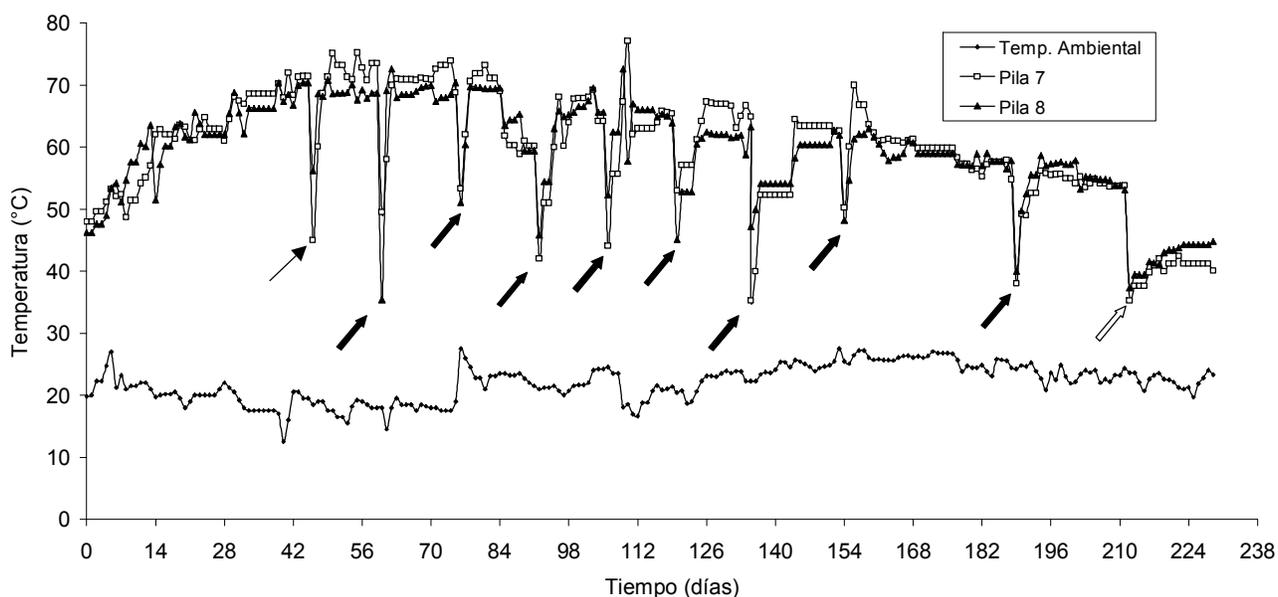


Fig. 4. Cambios de temperatura durante la biodegradación del bagazo de agave en el tratamiento 4. La flecha delgada indica el día del primer volteo, las flechas gruesas rellenas los días de volteo y la adición de vinazas y la flecha gruesa vacía el día de volteo y la adición de agua

pH

La **figura 5** presenta los cambios de pH registrados para los cuatro tratamientos durante el proceso de compostaje, que mostraron básicamente la misma evolución, un cambio paulatino de pH desde 5.4 hasta un máximo de 9.4 y 9.2 para los tratamientos 1 y 2 y de 9.1 para los tratamientos 3 y 4. Estadísticamente no hubo diferencia significativa en el valor final de pH entre los cuatro tratamientos ($p > 0.05$).

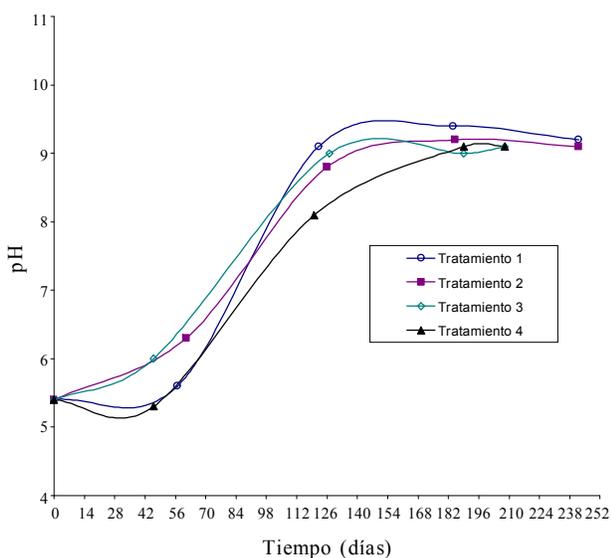


Fig. 5. Cambios de pH durante el proceso de biodegradación de diferentes mezclas de bagazo de agave

En la **figura 5** se puede apreciar que, en comparación con el tratamiento 1, en donde solamente se tenía bagazo de agave regado con agua la adición de vinazas en el tratamiento 2, no influyó de manera significativa en los cambios de pH (a pesar de que éstas tienen un valor de pH de 3.3), la adición de urea en el tratamiento 3 y la de urea y vinazas en el tratamiento 4. Se esperaba que al añadir vinazas con pH de 3.3 bajara el pH de las pilas de los tratamientos 2 y 4, factor que hubiera afectado la actividad microbiana en la etapa termofílica, hecho que no sucedió por los valores de pH y las altas temperaturas registradas. Los valores bajos de pH son un factor de inhibición en la fase de transición de mesofílica a termofílica (Sundberg *et al.* 2004). Los valores altos de pH, alcanzados en los cuatro tratamientos, presumiblemente se deban al desarrollo de iones NH_4OH de compuestos cuaternarios (Renalli *et al.* 2001) y/o a la hidrólisis alcalina de sales de K y Na de los materiales en compostaje (Tomati *et al.* 1995).

Degradación de materia orgánica

La **figura 6** muestra que la evolución de degradación de la MO, determinada como pérdida de MO, siguió una ecuación cinética de primer orden (ecuación 3) para los tratamientos 1 y 2, que es ampliamente utilizada en estudios de mineralización de carbono en suelos (Paredes *et al.* 2001) y en el compostaje de algunos sustratos en experimentos controlados de laboratorio (Haug 1993):

$$PS = 1 - e^{-kt}$$

Donde PS es la proporción de MO degradada, k la constante velocidad de reacción (días^{-1}) y t el tiempo (días). Para los tratamientos 1 y 2 se obtuvieron las constantes de degradación de 0.0142 (días^{-1}) y 0.0178 (días^{-1}), respectivamente.

Para los tratamientos 3 y 4, la evolución de degradación de la MO siguió una ecuación cinética de orden mixto (ecuación 5) que presenta una función sigmoidal (Fig. 6):

$$PS = \frac{K_1 / K_2}{1 + e^{a - k_1 t}}$$

donde, PS es la proporción de MO degradada, t el tiempo (días), k_1 la constante de aceleración de degradación de la MO (días^{-1}), k_2 la constante de desaceleración de degradación de la MO (días^{-1}) según la ecuación 6 de la sección teórica, y e^a la constante de la relación k_1 / k_2 con respecto a la proporción de pérdida de S a tiempo cero según la ecuación 13 de la sección teórica. Los valores de k_1 , k_2 y a para el tratamiento 3 fueron: 0.0624, 0.0672 y 3.667, respectivamente, y para el tratamiento 4: 0.0479, 0.0532 y 3.850, respectivamente.

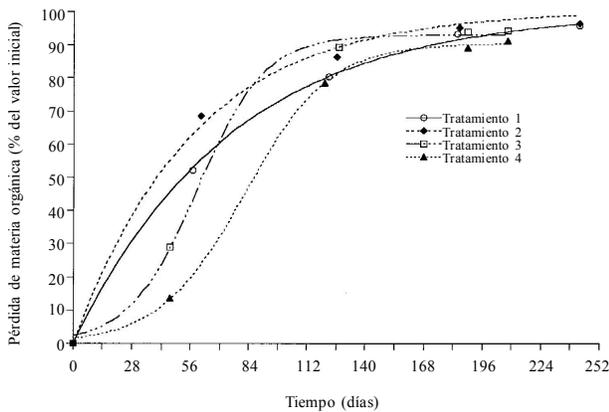


Fig. 6. Pérdida de materia orgánica durante la degradación del bagazo de agave

Para el tratamiento 3, la figura 7 muestra la representación gráfica de la ecuación 6 donde se puede apreciar que a los 58.8 días de compostaje se tuvo la mayor actividad en la pérdida de materia orgánica (46.4 %). Para el tratamiento 4 (Fig. 8) la mayor actividad en pérdida de materia orgánica se registró a los 80.3 días.

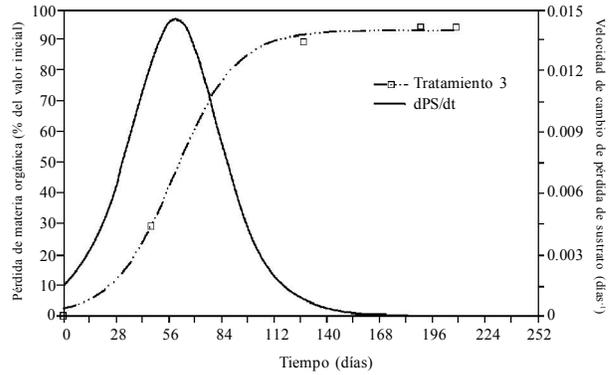


Fig. 7. Perfil de velocidad de pérdida de materia orgánica en el tratamiento 3

Con relación a la materia seca, en el tratamiento 1 se perdió el 52.8% y en tratamiento 2 el 59.1 %, esto es, una diferencia del 6.3 %, que es una diferencia estadísticamente significativa en la pérdida de materia seca al añadir vinazas a uno de los dos tratamientos (tratamiento 2. $p < 0.05$). Lo mismo sucedió en los tratamientos 3 y 4; la pérdida de materia seca en el tratamiento 3, en donde no se utilizaron vinazas fue del 56.7 %, mientras que en el tratamiento 4 en el que sí se utilizaron vinazas, fue del 63.7 %, esto es, una diferencia estadísticamente significativa del 7 % ($p < 0.05$). Por otro lado al hacer una comparación entre los tratamientos 1 y 3 en donde la diferencia fue que al tratamiento 3 se le añadió urea al inicio del compostaje y al tratamiento 1 no, se encontró una diferencia significativa ($p < 0.05$) en el tiempo de compostaje de 34 días, para alcanzar una pérdida de materia seca del 52.8 % para el tratamiento 1 en 242 días y del 56.7 % para el tratamiento 3 en 208 días, lo que indicó la influencia determinante que tuvo la adición de urea en el tiempo de compostaje en el

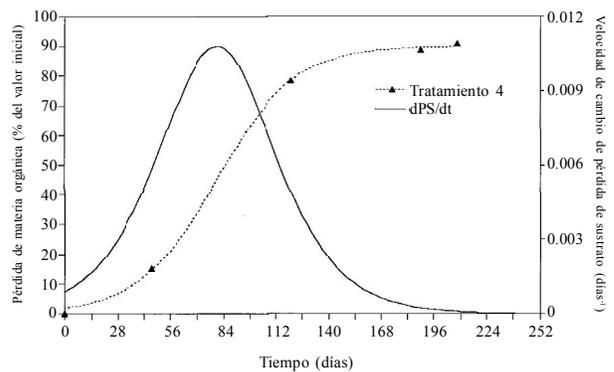


Fig. 8. Perfil de velocidad de pérdida de materia orgánica en el tratamiento 4

tratamiento 3. Esta misma influencia en la adición de urea se puede ver en los tratamientos 2 y 4 a los que se les añadieron vinazas, sólo que al tratamiento 4 se le añadió urea y al tratamiento 2 no. El tratamiento 2 tuvo una pérdida de materia seca del 59.1 % en 242 días y el tratamiento 4 del 63.7 % en 228 días, esto es, una diferencia significativa ($p < 0.05$) de 14 días y de 4.6 % de pérdida de materia seca entre ambos tratamientos.

Degradación de celulosa

La **figura 9** muestra que la evolución de degradación de la celulosa, determinada como pérdida de celulosa, siguió también como en el caso de la MO, una ecuación cinética de primer orden para los tratamientos 1 y 2, con constantes de degradación de 0.0142(días⁻¹) y 0.177 (días⁻¹), respectivamente, valores que coinciden casualmente con las constantes de degradación de la materia orgánica.

Para los tratamientos 3 y 4, la evolución de degradación de celulosa también siguió una ecuación cinética de orden mixto (**Fig. 9**), como en el caso de la materia orgánica, con valores de k_1 , k_2 y a para el tratamiento 3 de 0.0596, 0.0621 y 3.540, respectivamente, y para el tratamiento 4 de: 0.0462, 0.0483 y 3.771, respectivamente.

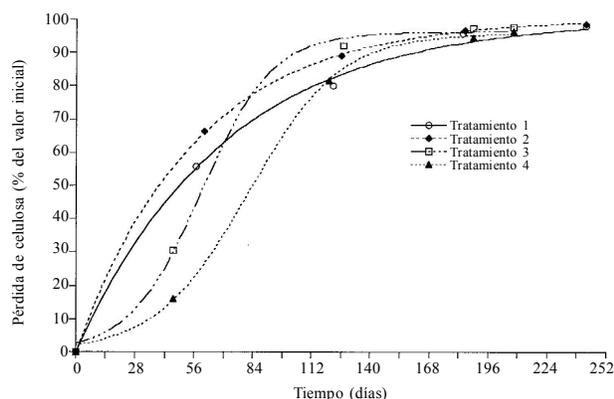


Fig. 9. Pérdida de celulosa durante la degradación del bagazo de agave

Para el tratamiento 3, la **figura 10** muestra la representación gráfica de la ecuación 6 donde se puede apreciar que a los 59.4 días de compostaje tuvo la mayor actividad en la pérdida de celulosa (48 %). Para el tratamiento 4 (**Fig. 11**) la mayor actividad en pérdida de celulosa (47.8 %) se registró a los 81.7 días.

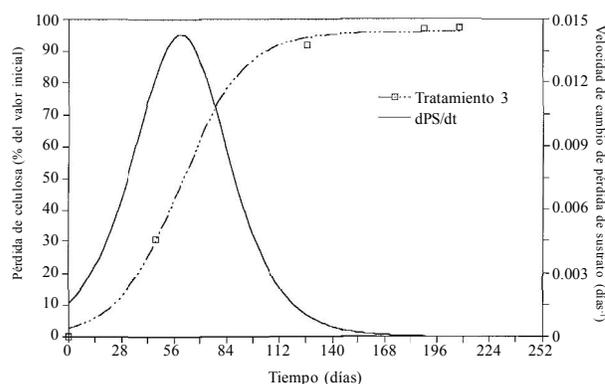


Fig. 10. Perfil de velocidad de pérdida de celulosa en el tratamiento 3

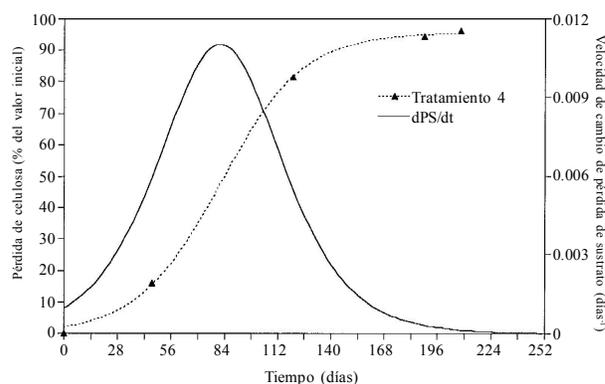


Fig. 11. Perfil de velocidad de pérdida de celulosa en el tratamiento 4

Urea

La adición de urea a los tratamientos 3 y 4 pudo haber retardado la degradación de la materia orgánica por los microorganismos ya que la urea ha sido utilizada como inhibidor microbiano en el ensilaje (Chestnut *et al.* 1988). Sin embargo el hecho de haberse retardado el inicio de la degradación de la materia orgánica, no fue motivo para que el proceso de compostaje durara más tiempo ya que la adición inicial de urea en los tratamientos 3 y 4 mejoró la relación C:N y preparó mejor el bagazo para el ataque microbiano. De hecho la urea también ha sido utilizada en la ganadería para mejorar la digestibilidad de residuos lignocelulósicos (Sundstøl y Coxworth 1984, Males 1987, Mason *et al.* 1988). La mayor relación inicial de C:N en el tratamiento 1, hizo que el tiempo de compostaje fuera mayor para este tratamiento (242 días, 45 °C) que para el tratamiento 3

(208 días, 43 °C) con una diferencia de 34 días. Además la adición de urea en el tratamiento 3 se reflejó en una degradación de materia seca 6.9 % mayor que en el tratamiento 1. En el tratamiento 3 se degradó el 56.7 % y en el tratamiento 1 el 52.8 % de la materia seca. Las pérdidas de MO y celulosa fueron muy similares para ambos tratamientos, para MO fue de 95.6 % para el tratamiento 1 y de 93.9 % para el tratamiento 3, y de celulosa de 82.1 % para el tratamiento 1 y de 81.6 para el tratamiento 3, aunque como ya se mencionó, con una diferencia entre ambos tratamientos de 34 días. Para los tratamientos 2 y 4 la diferencia en el tiempo de compostaje por la adición inicial de urea fue tan sólo de 14 días por la adición continua de nutrientes a través de las vinazas. Para el tratamiento 2 el tiempo de compostaje fue 242 días (42 °C), y para el tratamiento 4 de 228 días (42.5 °C). También en estos dos tratamientos la adición de urea se reflejó en una pérdida mayor del 7.2 % de materia seca en el tratamiento 4 en comparación con el tratamiento 2. La pérdida de materia seca para el tratamiento 2 fue de 59.1 % y para el tratamiento 4 de 63.7 %, aunque las pérdidas de MO fueron de 96.2 % para el tratamiento 2 y de 90.9 % para el tratamiento 4 y de celulosa de 84.6 % para el tratamiento 2 y de 77 % para el tratamiento 4. Esto probablemente debido a que al tratamiento 4 se le añadieron más vinazas que al tratamiento 2. Al final del experimento al tratamiento 4 se le añadie-

ron 0.912 L de vinazas por kg de bagazo húmedo inicial, mientras que al tratamiento 2 solamente se le añadieron 0.55 L de vinazas por kg de bagazo húmedo inicial. Esta diferencia en la adición de vinazas, se debió a que las pilas del tratamiento 4 casi siempre registraron menor humedad que las del tratamiento 2.

El **cuadro I** presenta algunas características químicas de los productos obtenidos de los tratamientos 1-4. Mayer y Hofer (1987) propusieron una relación C:N menor a 20 como indicador de madurez de compostas, en nuestro caso los valores de la relación C:N estuvieron dentro de esa recomendación. Del contenido de cenizas puede apreciarse el grado de mineralización del bagazo de agave durante el compostaje ya que inicialmente con un contenido de cenizas del 8.8 % terminó en el mejor de los casos con 51.8 % en el tratamiento 4. Para fortuna de este trabajo de investigación, como se puede apreciar en este mismo cuadro, la composta obtenida del tratamiento 4 es la que presenta mejores características agronómicas ya que es la que tiene mayor cantidad de nutrientes (N, P y K), la que está menos mineralizada (51.8 % de cenizas) y por consecuencia con un contenido mayor de materia orgánica (48.2 %), carbono orgánico total (27.0 %) y celulosa (9.6 %). Por otro lado es importante también resaltar la capacidad que tuvo el bagazo de agave para mineralizarse con sus propios constituyentes químicos a pesar de tener una relación inicial de C:N de 95.5.

CUADRO I. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BAGAZO DE AGAVE Y COMPOSTAS DE BAGAZO

Análisis ^a	Bagazo	Compostas ^b Tratamiento			
		1	2	3	4
Humedad (%)	71.00	43.1	45.7	53.7	56.0
PH	5.40	9.2	9.1	9.1	9.1
Materia orgánica (% BS)	91.20	31.4	28.6	38.6	48.2
Cenizas (% BS)	8.80	68.6	71.4	61.4	51.8
Carbono orgánico total (COT % BS)	50.60	17.4	15.9	21.4	27.0
Nitrógeno Total (NTK % BS)	0.53	1.0	1.0	1.40	1.90
Relación C:N	95.50	17.8	15.2	19.9	13.9
Fibra detergente neutro (FDN % BS)	58.80	72.8	73.2	66.6	58.3
Fibra detergente ácido (FDA % BS)	46.70	70.4	71.4	61.8	57.3
Hemicelulosa (% BS)	12.10	2.4	1.8	4.8	1.0
Celulosa (% BS)	41.90	7.5	6.4	7.7	9.6
Lignina detergente ácido (LDA % BS)	7.20	13.4	12.0	15.0	20.3
Conductividad ($\mu\text{mho cm}^{-1}$)	ND ^c	5.4	8.6	7.1	9.8
K total g kg^{-1}	ND	2.1	2.7	3.0	3.5
P total g kg^{-1}	ND	1.0	0.9	1.1	1.5

^a Promedio del análisis por triplicado de las muestras. ^b Promedio del análisis de las dos pilas. ^c No determinado

Solvita

Los resultados de la prueba de “solvita” mostraron valores de 8 para todas las muestras de composta, lo que significa que se obtuvieron compostas con alto grado de madurez e inactividad, en donde no se presentan restricciones para su uso.

Germinación y elongación de raíz

El **cuadro II** muestra que las semillas de pepino no pudieron germinar en el extracto de vinazas por posibles componentes fitotóxicos. Con los extractos de compostas se puede ver que en la respuesta a la tasa relativa de germinación sólo el extracto del tratamiento 1 tuvo un comportamiento igual al control, mientras que con los tratamientos 2, 3 y 4 las semillas tardaron un día más en germinar ya que las semillas en el testigo lo hicieron a los 2 días y las de los tratamientos a los 3 días. Se puede apreciar que en todos los casos la raíz de las semillas germinadas en extractos de composta crecieron 50 % más que el testigo a los 7 días de experimentación.

CUADRO II. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE GERMINACIÓN Y ELONGACIÓN DE LA RAÍZ DE SEMILLAS DE PEPINO GERMINADAS EN EXTRACTOS DE COMPOSTA Y SÓLIDOS DE VINAZAS

Evaluación	vinazas	Tratamiento			
		1	2	3	4
Tasa relativa de germinación (%)	0	100	150	150	150
Elongación relativa de raíz	0	150	150	150	150

Emergencia y vigor

El **cuadro III** muestra los resultados de la evaluación de madurez de las compostas en términos de brote y de vigor. De acuerdo con la metodología de bioensayos cualitativos descrita en los TMECC (2001), en los tratamientos 1 a 4 se tuvieron com-

postas muy maduras en cuanto a los resultados de emergencia (valores > 90 %). Valores de emergencia de 90-80 % y < 80 % indican estados de compostas maduras e inmaduras, respectivamente. Valores de vigor > 95 %, 85-95 % y < 80 % indican estados de compostas muy maduras, maduras e inmaduras, respectivamente, lo que significa que en los tratamientos 1, 2 y 4 se obtuvieron compostas muy maduras (valores > 95 %). En el caso del tratamiento 3 se obtuvo una composta madura (valor de 94 %).

CONCLUSIONES

Con base con los resultados obtenidos en este trabajo, se encontró que el compostaje es un método eficaz para el aprovechamiento en la agricultura del bagazo de agave y para el tratamiento de vinazas tequileras al eliminar problemas de fitotoxicidad. Regar suelos agrícolas con vinazas sin ningún tratamiento puede tener efectos nocivos sobre los cultivos. Se observó además que con la combinación de bagazo de agave, vinazas y urea, se acorta el tiempo de compostaje y el número de volteos a las pilas, con lo que se puede reducir el costo del proceso de compostaje a escala comercial.

REFERENCIAS

- Abdelhamid M. T., Horiuchi T. y Oba S. (2004). Composting of rice straw with oilseed rape cake and poultry manure and its effects on faba bean (*Vicia faba* L.) growth and soil properties. *Biores. Technol.* 93, 183-189.
- Anónimo (1993). Forging a link between composting and sustainable agriculture. *Compost Sci. Utilizat.* 1, 48-51.
- AOAC (1984). Official Method of Analysis. 14ava Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C.
- Bertran E., Sort X., Soliva M. y Trillas I. (2004). Composting winery waste: sludges and grape stalks. *Biores. Technol. Biores. Technol.* 95, 203-208.

CUADRO III. EVALUACIÓN DE INDICADORES DE MADUREZ

Parámetros ^a	Composta			
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Brote, %	101(1.27) ^b	107 (4.38)	95 (0.0)	106 (2.68)
Vigor, %	100 (0.0)	106 (5.79)	94 (1.27)	101 (1.41)

^aRepresenta el valor promedio de las dos pilas

^bDesviación estándar

- Cedeño C. M. (1995). Tequila production. *Crit. Rev. Biotechnol.* 15, 1-11.
- Chestnut A.B., Berger L.L. y Fahey Jr. G.C. (1988). Effects of conservation methods and anhydrous ammonia or urea treatments on composition and digestion of tall fescue. *J. Anim. Sci.* 66, 2044-2056.
- CRT (2002). Consejo Regulador del Tequila. <http://www.crt.org.mx>. Consultado en noviembre 15, 2003.
- Fraser B.S. y Lau A.K. (2000). The effect of process control strategies on composting rate and odor emission. *Compost Sci. and Utilizat.* 8(4), 274-292.
- García G.A., Roig A. y Bernal M.P. (2003). Composting of the solid fraction of live mill wastewater with olive leaves: organic matter degradation and biological activity. *Biores. Technol.* 86, 59-64.
- Georing H.K. y Van Soest P.J. (1970). Forage fiber analysis. Apparatus, reagents, procedure and some applications. *Agric. Handbook 379*. ARS. USDA. Washington DC, pp. 1-20.
- Golueke C.G. (1977). *Biological processing: composting and hydrolysis*. En *Handbook of solid waste management*, (D.G. Wilson Ed.) van Norstrand Reinhold, Nueva York, pp. 197-225.
- Golueke C.G. y Diaz L.F. (1996). Historical review of composting and its role in municipal waste management. En: *The science of composting*, Part 1. (M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes T. Papi, Eds.) Blackie, Glasgow, pp. 3-14.
- Haug R.T. (1993). Development of simulation models. En: *Handbook of Compost Engineering* (R.T. Haug Ed.) the Practical. Lewis Publishers, pp. 385-436. <http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>. Consultado en enero 3, 2003.
- Íñiguez C. G., Vaca P. y Rowell R.M. (2003a). Tequila, slaughterhouse wastes and composting. *BioCycle*, 57-60.
- Íñiguez C.G., Flores S. y Martínez L. (2003b). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 5: Biodegradación del material de descarte de la industria de curtiduría. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 19, 83-91.
- Ioanna M., Ehalotis C., Kotsou M., Balis C. y Georgakakis D. (2003). Respiration profiles in monitoring the composting of by-products from the olive oil agro-industry. *Biores. Technol.* 87, 331-336.
- Leege P.B. y Thomson W.H. (Eds.) (1997). Test methods for the examination of Composting and Compost. (Online). Disponible en <http://www.edaphos.com>. Consultado en julio 15, 1999. U.S. Composting Council, Ambest, Ohio.
- Males J.R. (1987). Optimizing the utilization of cereal crop residues for beef cattle. *J. Anim. Sci.* 65, 1124-1130.
- Mason V.C., Hartley R.D., Keene A.S. y Cobby J.M. (1988). The effect of ammoniation on the nutritive value of wheat, barley and oat straws. I. Changes in chemical composition in relation to digestibility *in vitro* and cell wall degradability. *Anim. Feed Sci. Technol.* 19, 159-171.
- Mayer M. y Hofer H. (1987). New trends in waste recycling. Technical Note. Buehler Brothers Ltd., Uzwil, St. Gallen, Suiza.
- Maynard A.A. (1994). Seventy years of research on waste composting and utilization at the Connecticut Agricultural Experimental Station. *Compost Sci. Utilizat.* 2, 213-221.
- Rynk R. (Ed.) (1992a). *On-farm composting handbook*. NRAES-54. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension, Ithaca, Nueva York. pp. 9 y 78.
- Paredes C., Roig A., Bernal M.P., Sánchez-Monedero M.A. y Cegarra I. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol. Fertil. Soils.* 32, 222-227.
- Paredes C., Bernal M.P., Roig A. y Cegarra J. (2001). Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes. *Biodegradation* 12, 225-234.
- Renalli G., Bottura G., Taddei P., Garavani M., Marchetti R. y Sorlini C. (2001). Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries. Bioindicators of monitoring and compost maturity. *J. Environ. Sci. Health A36*, 415-436.
- Simone J.L. y Barry R.T. (2003). Effects of pulp mill solids and three composts on early growth of tomatoes. *Biores. Technol.* 89, 297-305.
- Sundstøl F. y Coxworth E.M. (1984). Ammonia treatment. Straw and other fibrous by-products as feed. Straw and other fibrous by-products as feed (F. Sundstøl and E. Owen (Eds.)). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 196-247.
- Sundberg C., Smars S. y Jonsson H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Biores. Technol.* 95, 115-233.
- TMECC (2001). Tests Methods for the Examination of Composting and Compost. <http://tmecc.org/tmecc>. Consultado en agosto 12, 2003.
- Tomati U., Galli E., Pasetti L. y Volterra E. (1995). Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. *Waste Manage. Res.* 13, 509-518.
- Woods End Research Laboratory (1999). Guide to Solvita™ Testing for Compost Maturity Index. Disponible en <http://www.woodsendlab.org>. Consultado en noviembre, 1999. Woods End Research Laboratory. Mt. Veron., Main.