Rev. Int. Contam. Ambie. 27 (1) 47-59, 2011

UTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA. PARTE 9. MONITOREO DE LA EVOLUCIÓN DEL COMPOSTAJE DE DOS FUENTES DISTINTAS DE BAGAZO DE AGAVE PARA LA OBTENCIÓN DE UN SUBSTRATO PARA JITOMATE

Gilberto ÍÑIGUEZ[1], Gabino A. MARTÍNEZ[2], Paulina A. FLORES[2] y Gil VIRGEN[3]

[1] Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 52-93. C.P. 45020, Guadalajara, Jalisco.
[2] Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca, Oaxaca C.P. 71230.
[3] Universidad de Guadalajara, Departamento de Producción Agrícola. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco.

(Recibido septiembre 2009, aceptado noviembre 2010)

Palabras clave: residuos del tequila, biodegradación, composta, material de crecimiento

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio de compostaje de bagazo de agave utilizando nitrato de amonio (NH_4NO_3) como fuente de nitrógeno para ajustar la relación C:N del bagazo a 25:1. El compostaje fue con bagazo proveniente de dos fábricas de tequila ("La Cofradía" y "La Regional") donde la diferencia principal del bagazo es el sistema de extracción de los azúcares fermentables. Se formaron 4 pilas, dos por cada fuente de bagazo. Al formarse las pilas se colocaron en cada una de ellas a diferentes niveles, 8 sensores de temperatura. El promedio de los cambios de temperatura se graficó para cada día. Tanto los bagazos como sus respectivas compostas fueron analizados por pH, conductividad y densidad de campo, así como por su contenido de cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total (COT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK) hemicelulosa y celulosa. Después de 126 días de compostaje, la pérdida real de materia seca y teóricas de materia orgánica y volumen fueron de 62.2, 73.6 y 76.9 % respectivamente para la composta con bagazo de "La Cofradía", mientras que para la composta con bagazo de "La Regional" las pérdidas fueron del 65.8, 71.5 y 76.9% respectivamente. También a las compostas se les realizó un análisis de fitotoxicidad y granulometría, así como algunas determinaciones de propiedades hidrológicas como agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva (AR), agua difícilmente asimilable (ADA) y capacidad de aire. Al refinar las compostas de ambas tequileras se lograron obtener algunas características hidrológicas muy similares a las de una turba. En pruebas de invernadero con jitomate, no se encontró diferencia significativa ($p \leq 0.5$) entre usar las dos compostas de bagazo de agave y los substratos comerciales (estopa de coco y "cocopeat") al evaluar la producción y calidad de jitomates del primero al quinto corte después de 55 días del transplante.

Key words: tequila residues, biodegradation, compost, material for cultivation

ABSTRACT

The present paper reports on the results of an agave bagasse composting study using ammonium nitrate (NH_4NO_3) as nitrogen source to adjust the agave bagasse C:N ratio to 25:1. The bagasse was supplied by two tequila factories ("La Codradía" and "La Regional") where the principal difference was the fermentable sugars extraction system. Four piles were formed, two for each bagasse source. Temperature profiles were monitored to assess the progress of the composting process. Average readings were recorded for each day. The parent agave bagasse and composts were analyzed for pH, conductivity, field density, ash content, organic matter, organic total carbon (COT), total nitrogen Kjeldahl (NTK), hemicellulose and cellulose content. After 126 days of composting, the real dry matter lost, and the organic matter and volume theoretically lost were 62.2, 73.6 and 76.9 %, respectively, for compost with "La Codradía" bagasse, whereas for compost with "La Regional" bagasse the respective losses were 65.8, 71.5 and 76.9 %. The composts were also analyzed for particle size, easily available water (EAW), water buffer capacity (WFC), difficultly available water (DAW) and air capacity (AC). Machine refined composts featured some hydrological characteristics similar to those of peat moss. The field study, using the agave bagasse composts as substrates for tomato production, did not reveal statistically significant differences ($p < 0.05$) when compared to the commercial substrates normally employed to improve nutrient takeup (coconut bagasse and cocopeat) in the first four cuts after 55 days of seedling transplant.

INTRODUCCIÓN

Es mundialmente conocida la importancia que tiene la industria del tequila en México, principalmente en el estado de Jalisco. Desde hace tiempo su desarrollo industrial ha ido en constante crecimiento con dos importantes problemas por 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. Si se considera que en el año 2008 se molieron 834 mil toneladas de agave (CRT 2008) se concluye que en tal sólo ese año se generaron 333 600 toneladas de bagazo. Tradicionalmente el bagazo de agave había sido utilizado para la fabricación de ladrillos y colchones, pero para los grandes volúmenes que se generan, este aprovechamiento no representaba un impacto importante en la utilización de este material, por lo que la industria del tequila se vio obligada en los últimos años a buscar alternativas de manejo en grandes volúmenes. Así, se decidió por el compostaje para resolver este problema, aunque buscando siempre que durante el proceso se pudieran tratar simultáneamente sus aguas residuales o vinazas. Sobre este aspecto Íñiguez *et al.* (2004) publicaron que utilizando bagazo crudo de 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, se utilizaron apenas 0.55 L de vinazas por kg de bagazo húmedo (71 %) para el compostaje durante 242 días. A pesar de que se ha logrado adquirir experiencia a nivel de campo sobre el compostaje del bagazo de agave en pilas o en hileras, ésta ha sido siempre una alternativa de disposición de las vinazas y en la literatura hay poca información sobre el compostaje de bagazo sólo, sobre todo para obtener un producto que pudiera servir como substrato para la germinación de semillas o desarrollo de plántulas de hortalizas. El objetivo del presente trabajo fue estudiar el proceso de compostaje de un bagazo al que se le ha removido la mayor parte de la médula durante la extracción de los azúcares fermentables y de otro bagazo considerado como típico, para la obtención de un substrato que pueda sustituir a los comúnmente utilizados en el cultivo de jitomate en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El bagazo de agave utilizado para este estudio fue proporcionado por dos fábricas de tequila, "La Regional" y "La Cofradía". En la tequilera "La Regional", las cabezas de agave de donde se obtuvo el bagazo fueron cocinadas en autoclaves durante un periodo de nueve horas para luego pasarse por

una desgarradora consistente en una pequeña flecha provista de varias hileras de cortadoras a manera de cabezas de hacha alineadas horizontalmente, con otra hilera de cabezas de hachas colocada en forma fija frente a la flecha en movimiento. Después de la desgarradora, el material destrozado pasó por una serie de cuatro molinos a manera de rodillos donde el material era lavado con agua de la llave y exprimido para extraer al máximo los azúcares fermentables para la elaboración del tequila. Después de este proceso es de donde se obtuvo el bagazo de agave para la realización de este estudio. En la tequilera "La Cofradía", las cabezas de agave de donde se obtuvo el bagazo fueron cocidas en hornos de mampostería por un tiempo de 36 horas para después pasarlas por una desgarradora similar a la utilizada en la tequilera "La Regional". Después de la desgarradora, el material destrozado pasó por dos desmeduladoras colocadas en serie, consistentes en cilindros de acero inoxidable con un eje central provisto de varias aspas para facilitar el desprendimiento de la médula y el transporte del material destrozado de un extremo a otro. Los mismos cilindros estaban provistos a lo largo de la parte alta, de varias llaves de agua para la extracción de los azúcares fermentables mediante el "lavado" del material destrozado. La parte baja de los cilindros estaba provista de una malla por donde salían los jugos en conjunto con la médula desprendida de las fibras del agave. Al final de los dos cilindros se encontraba una prensa de rodillos para extraerle a las fibras de agave lo más posible de azúcares. Después de este proceso es de donde se tomó el bagazo de agave para el desarrollo de la presente investigación.

Proceso de compostaje

Se pusieron en compostaje 4 pilas de bagazo de agave, dos con bagazo de la fábrica de tequila "La Cofradía" (1130 kilogramos por pila en base húmeda) y dos con bagazo de la fábrica de tequila "La Regional" (una pila con 1210 kilogramos y la otra con 1190 kilogramos de bagazo en base húmeda). A cada una de las pilas se les añadió nitrato de amonio (NH_4NO_3 grado fertilizante) para ajustar la relación C:N del bagazo a 25:1. Durante el tiempo que duró el compostaje (126 días), diariamente se midió la temperatura de cada pila, colocando en diferentes lugares 8 sensores (termómetros de carátula de 13 cm de diámetro con varilla de 60 cm de largo) para graficar luego el promedio de los cambios de temperatura con relación al tiempo transcurrido. También se registró la temperatura promedio del ambiente. Las pilas se removieron semanalmente para facilitar la aireación, aprovechando la oportunidad para añadir agua de la llave las veces que fuera necesario para conservar la humedad de las pilas en un rango entre el 40 y 65 % recomendado por Rynk (1992) para lograr una buena y rápida biodegradación. Al inicio y a las semanas 4, 8, 12, 16, y 18 de compostaje, se tomaron muestras compuestas de las pilas para los análisis de humedad o materia seca, carbono orgánico total, cenizas, nitrógeno total Kjeldahl, pH, conductividad eléctrica, hemicelulosa y celulosa. La muestra compuesta de cada pila se obtuvo partiendo las pilas longitudinalmente en dos partes y tomando en una de ellas, dos litros de cada uno de nueve puntos seleccionados al azar (tres en la parte de abajo, tres en medio y tres arriba). Los 18 litros de muestras, se mezclaron en una bolsa de plástico para tomar luego tres submuestras de dos litros cada una. Una submuestra para el análisis de humedad y el resto para secarse a 50 ºC para luego molerse y guardarse en bolsas de plástico para los análisis químicos y físicos posteriores.

Análisis químico

El contenido de nitrógeno total (NTK) fue determinado por el procedimiento macro Kjeldahl (AOAC 1984). La humedad o materia seca se determinó al secar una muestra durante 24 horas a 105 ºC. Para el análisis de cenizas se puso esta misma muestra a la mufla a 550 ºC por 2 horas. El material volátil se consideró 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 CWMI (1976). El pH fue medido con un potenciómetro Hanna pH 211 y la conductividad se tomó con un medidor de temperatura y conductividad modelo 407303, marca Extech. 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 anteriores de carbono y nitrógeno total Kjeldahl. Las determinaciones de celulosa y hemicelulosa fueron realizadas mediante los análisis de fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) y lignina detergente ácido (LDA) de acuerdo a la técnica descrita por Georing y Van Soest (1970). El contenido de hemicelulosa se calculó por la diferencia de la FDA y la FDN. El contenido de celulosa se calculó por la diferencia de la LDA y la FDA. La proporción de pérdida de materia orgánica (MO) por la mineralización durante el compostaje se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación propuesta por Íñiguez *et al.* (2006):

$$R_m = 1 - (A_i / A_f) \quad (1)$$

Donde A_i representa la masa de sólidos no volátiles (SNV, cenizas) inicial, y A_f la masa de SNV en cualquier momento de la toma de muestras en el tiempo de compostaje. Al multiplicar por 100, Rm expresa la pérdida de la masa como porcentaje de la masa inicial. La fracción de volumen perdido durante el compostaje se calculó utilizando las mediciones inicial y final de cenizas y densidad de acuerdo a Íñiguez *et al.* (2006):

$$Rv = 1 - [(A_i / A_f)(D_i / D_f)] \quad (2)$$

Al multiplicar Rv por 100 se expresa la pérdida de volumen como porcentaje del volumen inicial.

La pérdida de COT y nitrógeno se calculó de acuerdo con la ecuación:

$$PS = 1 - \frac{YX_0}{Y_0X}$$

Donde Y_0 es el porcentaje inicial de carbono o nitrógeno, Y el porcentaje de carbono o nitrógeno en cualquier punto del muestreo, X_0 porcentaje inicial de cenizas y X el porcentaje de cenizas en cualquier punto del muestreo. La densidad de campo fue determinada de acuerdo con la técnica descrita por el TMECC (2001. Método 3.01-C). Para esto se puso una muestra de bagazo de agave hasta una tercera parte de una cubeta de 21 litros, esta se dejó caer al suelo 10 veces para añadir luego otra tercera parte más de bagazo y dejar caer la cubeta nuevamente al suelo otras 10 veces. Finalmente se llenó completamente la cubeta con bagazo y se dejó caer otras diez veces para al final volver a llenar la cubeta y con una regla dejarla al ras. La cubeta se pesó y se tomaron muestras para el análisis de humedad ya que la densidad es reportada en base seca.

Análisis granulométrico

Muestras compuestas de las 2 compostas al final del compostaje fueron sometidas a un análisis granulométrico. Para esto se colocaron 100 g de muestra de composta en tamices ordenados por tamaño (4.7, 2.0 1.0, 0.5, 0.25, 0.10 mm) en una tamizadora que se hizo funcionar durante 10 minutos de forma intermitente. Al cabo de este tiempo, se pesó el contenido de cada tamiz y del colector del fondo en recipientes tarados con una precisión de 0.01 g. Por otro lado para determinar el contenido de fibra y médula a muestras de bagazo de agave, una muestra de peso determinado se pasó a mano por una malla tipo harnero con aberturas de 0.7 x 0.7 mm. Los resultados se expresaron en por ciento en base húmeda.

Características hidrológicas

A muestras de compostas, compostas refinadas y turba, se les determinaron algunas características hidrológicas como: densidad aparente (DA), densidad real (DR), espacio poroso total (EPT), agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva (AR), agua difícilmente asimilable (ADA), capacidad de aireación (CA) y materiales sólidos (MS). La DA se evaluó determinando materia seca a 105 ºC contenida en un volumen conocido y la DR estimada a partir de las cenizas. El espacio poroso total se calculó en función de los dos parámetros antes señalados según la formula EPT = $[(1 - DA_{seca})/DR]$ x 100 (%). Los otros parámetros, AFA, AR, ADA, CA y MS se obtuvieron a partir de curvas de liberación de agua construidas con los resultados obtenidos por medio de un tensiómetro tipo Boodt (De Boodt *et al.* 1974) basado en el principio de vasos comunicantes. Para esto se determinó primeramente la humedad a muestras representativas de compostas, compostas refinadas y turba. Por simplificación para explicar el procedimiento, la siguiente descripción se refiere a una sola muestra aunque los análisis se desarrollaron por triplicado. Por separado se pesó un embudo con placa porosa lleno de agua en la parte inferior (A). En seguida se puso en el embudo una capa de muestra entre 2 y 3 cm, para pesarse luego junto con el embudo (B). La muestra se saturó con agua durante 24 horas. Después de alcanzar el equilibrio, se aplicó al embudo una succión de 10 cm durante 12 horas en un equipo de succión habilitado para correr 9 muestras a la vez. Después del equilibrio, se cerró la llave de doble paso para desconectar el embudo del sistema de succión y pesarse (C). Una vez pesado, se conectó de nuevo al sistema de succión. Posteriormente se volvió a aplicar succión al embudo pero esta vez de 50 cm abriendo la llave de doble paso. Después de 12 horas se repitió el mismo procedimiento que se realizó para la succión de 10 cm. Luego se repitieron los mismos pasos pero esta vez para una succión de 100 cm. La variables fueron peso del embudo (A), peso del embudo más la muestra (B) al momento de ponerla; contenido de humedad (%) de la muestra al momento de ponerla (X), peso de la muestra al ponerse en el embudo (B-A) y contenido de materia seca en el embudo (D), el cual se calculó mediante D = (B – A) (100 – X)/100. A cualquier succión se sabe: el peso del embudo más el de la muestra (C); el peso de la muestra húmeda (C – A); y la cantidad de agua en la muestra (C – A – D). El porcentaje de humedad en la muestra en base peso húmedo (E) está dado por E % = 100 (C – A – D/C – A). El porcentaje de humedad en la muestra en base peso

seco = 100xE/100-E y el porcentaje de volumen en la muestra = (100xE/100-E) BD. La refinación de las muestras de compostas consistió en pasar el material a través de un refinador (Sprout-Waldron operation modelo 105-A), ajustando la abertura de los discos en tres posiciones diferentes (50, 30 y 15 mm). Las muestras pasaron una sola vez por la abertura señalada de los discos. La refinación se realizó en húmedo, esto es, añadiendo agua corriente, conforme pasaba la muestra por los discos de refinación.

Pruebas biológicas

Brote y vigor relativo de plantas de pepino. Al final del período de compostaje, al bagazo de agave y al producto del compostaje de las dos tequileras, se les realizaron estudios de brote y vigor relativo de acuerdo a la técnica descrita por el TMECC (2001. Método 05.05-A) Para esto se utilizaron 5 charolas de poliestireno de 34 x 34 cm con 100 celdas (2.5 x 2.5 x 7 cm) cada una. En las charolas, se llenaron tres hileras adyacentes con la combinación composta-vermiculita (50-50 % en volumen) y tres hileras con la combinación bagazo de agave-vermiculita (50-50 % en volumen) procurando que la mezcla no se perdiera en los orificios de drenado. En una sexta charola se evaluó también la fitotoxicidad de un bagazo de agave que no había sido cocido para hidrolizar los azúcares fermentables sino que estos habían sido extraídos con agua caliente. Como testigo positivo para cada charola, se llenaron tres hileras de 10 celdas cada una con turba sin que estas quedaran pegadas a las muestras de composta o bagazo. Como testigo negativo, se puso también en cada charola una hilera de 10 celdas llenas de vermiculita. Posteriormente se colocaron dos semillas de pepino por celda, cubriéndolas con aproximadamente 1 cm del material a evaluar. Cada charola se colocó bajo la influencia de luz fluorescente en una jaula forrada con plástico traslúcido (50 x 50 x 24.5 cm) para ayudar a conservar la humedad del material durante la evaluación. La temperatura dentro de las cámaras se mantuvo en aproximadamente 27 ºC. Después de 14 días, se removieron las plantitas de cada charola, registrándose el número de plantas con cotiledones e hipocotiledones totalmente expuestos, para evaluar el brote y el vigor relativo.

Pruebas de campo

Las compostas de bagazo de agave fueron probadas como substrato para el cultivo de jitomate en un vivero comercial de 24 hectáreas, implementado con alta tecnología bajo un sistema de hidroponía. Para esto se estableció un diseño de experimentos completamente al azar de cuatro tratamientos y 10 repeticiones por tratamiento teniendo una maceta por repetición, con una plántula de jitomate (*Bizart* injertada de *Maxifort*) de dos guías por maceta. Los tratamientos fueron: 1) mezcla compuesta de pila 1 y 2 de composta de "La Cofradía", 2) mezcla compuesta de pila 1 y 2 de composta de "La Regional", 3) estopa de coco y 4) substrato de importación a base de estopa de coco comprimida (llamado "cocopeat"). Los substratos de los tratamientos 1, 2 y 3 se colocaron a manera de macetas, en bolsas de plástico, añadiendo dos paladas de grava de tezontle en el fondo de la bolsa, más aproximadamente 16 litros del respectivo substrato. El substrato del tratamiento 4 estaba compactado y empacado en una bolsa de plástico, que al añadirle agua, se hinchó hasta un volumen similar a los otros substratos. Una vez distribuidos los tratamientos al azar, las bolsas se colocaron sobre rieles de drenado para añadirles suficiente agua de la llave hasta bajar la conductividad a 0.1 mmhos/cm. Posteriormente a cada bolsa se le colocaron tres mangueras para el suministro de los nutrientes requeridos por la planta en forma líquida. La evaluación del comportamiento de las compostas como sustrato para el cultivo de jitomate se realizó con base en los cuatro primeros cortes después de 55 días de haber trasplantado las plántulas. La evaluación consistió en el total de kilogramos de jitomate cosechados por corte, así como la calidad de los mismos con base en los estándares de la compañía consistentes en tamaño, color y deformación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El **cuadro I** presenta algunas propiedades físicas y químicas del bagazo de agave de las dos tequileras estudiadas, así como de las compostas derivadas de estos bagazos. En este cuadro se demuestra que así como existió diferencia en los dos procesos de obtención de bagazo de agave, también química y físicamente hay importantes diferencias. Por ejemplo, el contenido de médula y fibra fue marcadamente diferente, la diferencia en el contenido de material fino (médula) se reflejó en la densidad de campo para las dos fuentes de bagazo. El bagazo de "La Regional" con un contenido de médula del 56.3 % tuvo una densidad de 123.9 kg m^{-3}, mientras que el bagazo de "La Cofradía" con un contenido menor de médula (34.4 %), tuvo una densidad de campo de 90.6 kg m^{-3}. La diferencia en los procesos de obtención del bagazo también se vio reflejada en el contenido

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

	Bagazo de agave		Origen de la composta	
Análisis[a]	"La Cofradía"	"La Regional"	"La Cofradía"	"La Regional"
Médula (%)[b]	34.40	56.30	-----[c]	-----
Material Fibroso (%)[b]	65.60	43.70	-----	-----
Humedad (%)	64.40	66.20	60.6	45.7
Materia seca (%)	35.60	33.80	39.4	54.3
pH	3.51	3.52	5.5	5.8
Conductividad mmho cm^{-1}	1.51	1.31	14.4	11.9
Densidad de campo (Kg m^{-3})[d]	90.60	123.90	106.9	142.0
Cenizas (%)[d]	3.10	5.30	11.8	18.6
Materia orgánica (%)[d]	96.90	94.70	88.3	81.4
Carbono orgánico total (%)[d]	53.83	52.61	49.0	42.5
Nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK, %)[d]	0.27	0.35	3.0	3.1
Relación C:N	199.40	150.32	16.2	14.5
Fibra detergente neutro (FDN, %) [d]	55.33	57.80	-----	-----
Fibra detergente ácido (FDA, %) [d]	47.40	42.95	-----	-----
Hemicelulosa (%)[d]	7.94	14.85	3.4	2.4
Celulosa (%)[d]	14.26	14.16	14.4	8.0
Lignina detergente ácido (%) [d]	32.31	28.79	-----	-----

[a] Promedio del análisis por triplicado de las muestras
[b]Base húmeda
[c]No determinado
[d]Base seca

de hemicelulosa. El bagazo de "La Regional" con mayor contenido de médula, tuvo más de hemicelulosa (14.85 %) que el bagazo de "La Cofradía" (7.94 %). Por otro lado, el bagazo con menor contenido de médula ("La Cofradía"), tuvo mayor contenido de LDA (32.31 vs 28.79 %). Los bagazos como el del agave, son considerados residuos lignocelulósicos y como tales tienen poco contenido de nitrógeno. En este caso, el bagazo de "La Cofradía" tuvo un contenido de NTK de 0.27 % y el de la "La Regional" de 0.35 %, contenido de nitrógeno que al ser relacionado con su contenido de COT, dio una relación baja de C:N, de 199.4 para el bagazo de "La Cofradía" y de 150.3 para el de "La Regional". De aquí la necesidad de haber añadido una fuente de nitrógeno (nitrato de amonio) al inicio del compostaje para establecer una relación C:N de 25:1, valor recomendado para favorecer una buena biodegradación (25:1 a 30:1. Rynk 1992, Willson 1989). Valores bajos conducen a tener un exceso de nitrógeno disponible y mayores pérdidas en forma de amoniaco, dentro de los gases que se desprenden en el proceso de compostaje, en cambio, valores altos dilatan la biodegradación de residuos ricos en carbono (Sommer y Dahl, 1999, Tiquia y Tam, 2000, Pagans *et al.* 2006). En la **figura 1** se presenta la evolución de la relación C:N y en la **figura 2** la pérdida de nitrógeno durante 126 días de compostaje. En los primeros 28 y 56 días de proceso, en las pilas se percibió un ligero olor a amoniaco, lo que significó la pérdida de nitrógeno que se ilustra en la **figura 2**, donde se ve que las pérdidas en estos primeros 56 días fueron del 63.5 % para las pilas de "La Cofradía" y del 56 % para las pilas de "La Regional". Esas pérdidas se vieron reflejadas al aumentar la relación C:N durante esos días. Después de la octava semana, la relación C:N bajó hasta quedar finalmente en 16.2 para el bagazo de "La Regional" y de 14.8 para el bagazo de "La Cofradía". De acuerdo a Lar-

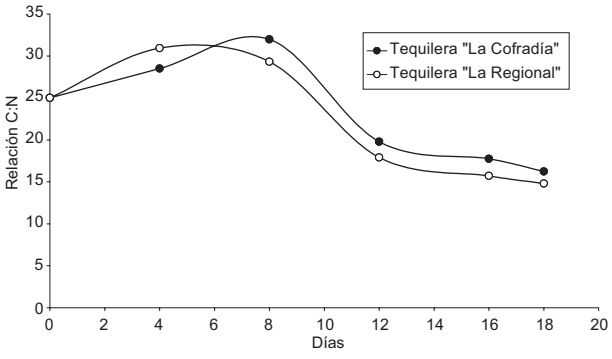

Fig. 1. Relación C:N durante el compostaje del bagazo de agave de dos tequileras

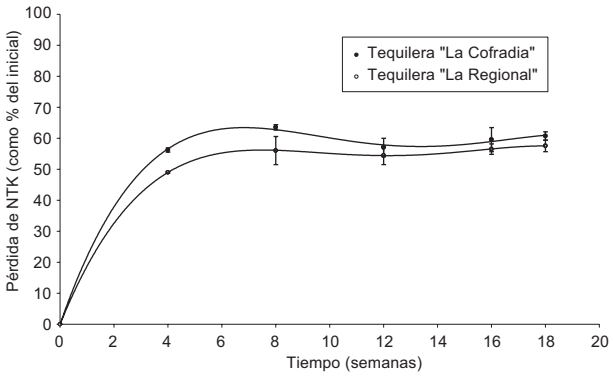

Fig. 2. Pérdidas de nitrógeno total Kjeldahl en relación al tiempo de compostaje del bagazo de dos tequileras

ney y Hao (2007), la relación C:N es un indicador de la estabilidad de la composta, la cual disminuye conforme avanza el proceso de compostaje a valores cercanos a 10:1. Zucconi y de Bertoldi (1987) por ejemplo, sugirieron que una disminución de un valor inicial de C:N de 33-40 o mayor, a un valor final de 18-20 o menor, implicaría un avanzado grado de estabilización.

Evolución de la temperatura

Las temperaturas que se generaron dentro de las pilas de compostaje dan una idea de la intensidad de biodegradación por la actividad microbiana, así como la madurez de la materia orgánica (Charnay 2005). Las **figuras 3** y **4** muestran las evoluciones de temperatura de acuerdo con la tendencia esperada (Ross *et al.* (2006), esto es, un incremento debido a la hidrólisis rápida de la materia orgánica disponible por los microorganismos presentes en las pilas de compostaje. En estas figuras también se ilustran los días en que se movieron las pilas para facilitar la aireación y la adición de agua según fue necesario. Como se puede apreciar en las figuras, debido a la fuente diferente de bagazo de agave, se presentaron distintos patrones en la evolución de la temperatura. En la **figura 3** se aprecia que la temperatura máxima alcanzada fue de 59 ºC el día 23 de compostaje y durante el resto del proceso, la temperatura no rebasó este valor. En cambio en la **figura 4** se puede apreciar que en el día 23 la temperatura máxima alcanzada fue de 60 ºC, rebasando este valor en promedio del día 38 al 63 de compostaje, en otras palabras, se alcanzaron mayores temperaturas de compostaje con el bagazo de "La Regional" que con el de "La Cofradía". El alcanzar temperaturas superiores a los 59 ºC en ese tiempo o más pronto, depende del tipo de residuos que se estén sometiendo a proceso. Por ejemplo, Bertran *et al.* (2004) en el compostaje de residuos de viñedos con lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales, lograron temperaturas de 74 ºC a los 54 días. Íñiguez *et al.* (2003) en el compostaje de material de descarne de la industria de curtiduría, lograron temperaturas de 54 ºC en los primeros 14 días y de 75 ºC a los 28 días. También Íñiguez *et al.* (2006) en el compostaje de biosólidos con bagazo de agave alcanzaron temperaturas de 65 ºC en los primeros 18 días. Aunque las temperaturas mesofílicas (10-40 ºC) facilitan también un efectivo compostaje, la mayoría de los expertos sugiere mantener la temperatura entre 44 y 65 ºC (Rynk 1992). En términos generales, con excepción de algunos puntos sobre todo cuando se movieron las pilas para facilitar la aireación, el proceso de compostaje con ambos bagazos se realizó en el rango de temperatura recomendado por los expertos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO 2006), se menciona además que se logra el saneamiento del algún material fecal en el compostaje,

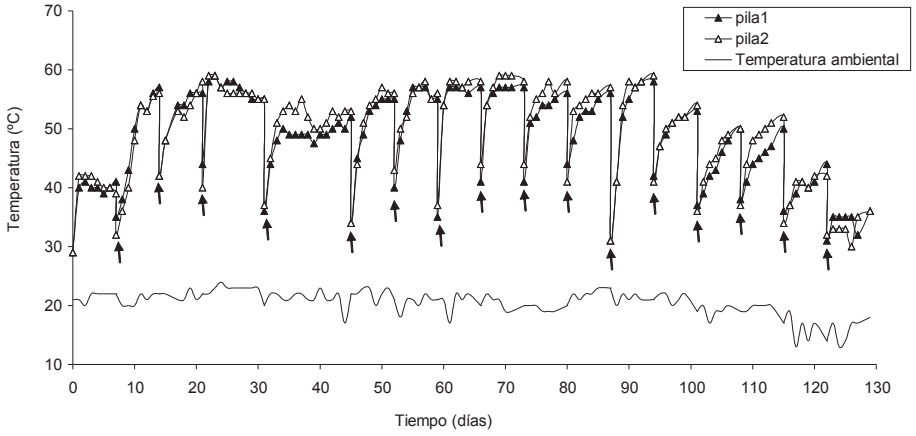

Fig. 3. Cambios de temperatura durante el compostaje de bagazo de agave de la tequilera "La Cofradía". (Las flechas indican el día de movimiento de las pilas)

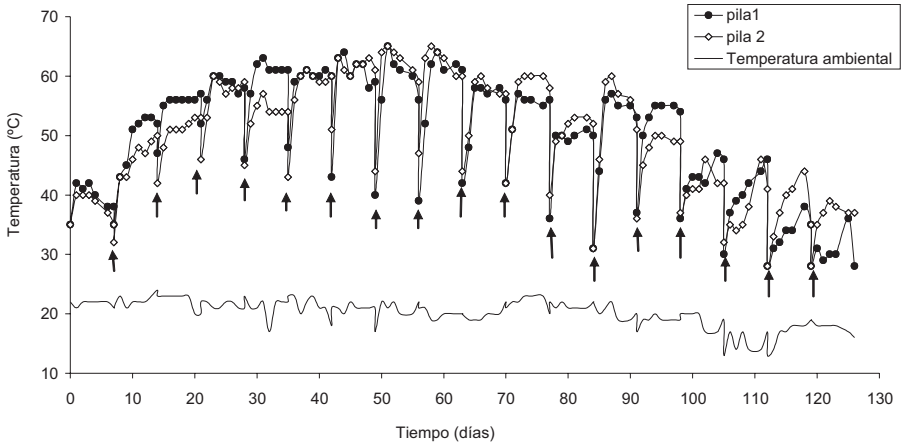

Fig. 4. Cambios de temperatura durante el compostaje de bagazo de agave de la tequilera "La Regional" (Las flechas indican el día de movimiento de las pilas)

si se tiene y mantiene la temperatura por arriba de los 50 ºC por lo menos durante una semana (EFSA 2007). A los 126 días de compostaje se dio por terminado el proceso, al bajar y estabilizarse la temperatura en los 30-36 ºC para ambos bagazos. Al final de este tiempo el producto del compostaje presentó olor similar a una tierra de jardinería con un color café rojizo.

Pérdidas de materia seca, materia orgánica y volumen

Al final del período de compostaje de 126 días, las pérdidas de materia seca en las pilas con bagazo de "La Cofradía" fueron del 62.2 % mientras que para las pilas con bagazo de "La Regional" fueron del 65.8 %. Una diferencia entre ambos bagazos apenas del 3.6 %, debido probablemente al mayor contenido de médula en el bagazo de "La Regional". Íñiguez *et al.* (2006) al someter a compostaje durante 155 días, biosólidos y bagazo de agave en una proporción en kilogramos (base húmeda) de 1:1.9, tuvieron una pérdida de materia seca del 67.8 %. Por otro lado al relacionar los porcentajes de pérdida de materia orgánica (ecuación 1) y volumen (ecuación 2), para el compostaje de bagazo de "La Cofradía", se encontró un coeficiente de correlación de 0.99 con una ecuación de la recta de: $y = 1.3425x–0.499$. Para el compostaje de bagazo de "La Regional" el coeficiente de correlación fue de 0.97 con una ecuación de la recta de: $y = 0.99x–0.911$. Después de 126 días de compostaje las pérdidas teóricas de volumen (ecuación 2) fueron del 76.9 % para el bagazo de ambas tequileras (**Fig. 5**). Las observaciones demostraron que la reducción de volumen durante el compostaje se debió a la reducción del tamaño de partícula de los bagazos, el aumento de la densidad de campo (**Cuadro I**), así como a la

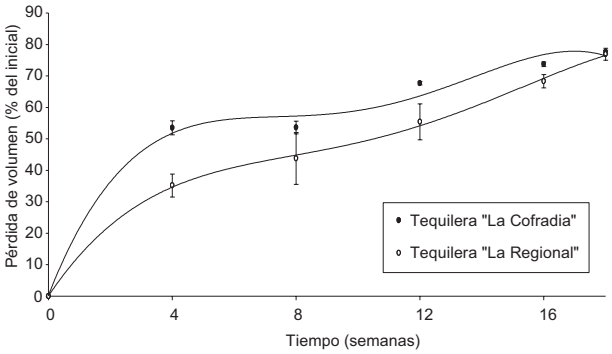

Fig. 5. Cambios de volumen durante el compostaje de bagazo de agave de dos tequileras. Valores expresados como la media de las dos pilas ± la desviación estándar

pérdida de la materia seca. Las pérdidas teóricas de materia orgánica, de acuerdo a la ecuación 1, fueron muy similares para ambos bagazos: 73.6 % para el bagazo de "La Cofradía" y 71.5 % para el bagazo de "La Regional" (**Fig. 6**). Debido a las cantidades relativamente pequeñas de materia prima que se utilizaron para este estudio de compostaje fue posible determinar, en la práctica, las pérdidas de materia orgánica para el bagazo de ambas tequileras. Para el bagazo de "La Cofradía" esta pérdida fue del 65.6 %, teniendo una diferencia del 8.1 % con la pérdida teórica (73.6 %), mientras que para el bagazo de "La Regional", la pérdida fue del 65.8 %, una diferencia con la pérdida teórica del 5.7 % (71.5 %). Estos resultados demuestran la validez de poder utilizar la ecuación 1 para calcular la pérdida de materia orgánica cuando se realicen compostajes de estos bagazos a mayor escala, tomando en cuenta solamente el contenido de cenizas al inicio y final del proceso sin tener que pesar los kilogramos de masa obtenida.

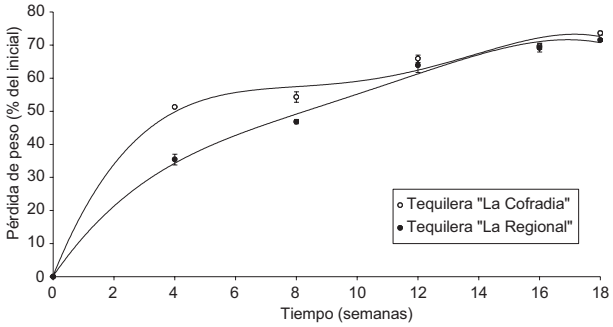

Fig. 6. Pérdida de peso del bagazo de agave durante el compostaje. Valores expresados como la media de las dos pilas ± la desviación estandar

Evolución del pH

La **figura 7** presenta la evolución de los valores de pH en muestras de bagazo de agave y compostas de las fábricas de tequila "La Cofradía" y La Regional". Para las muestras de la primera tequilera, la evolución del pH fue siempre en ascenso desde un valor de 3.5 hasta 5.5 al final del compostaje. En cambio para las muestras del bagazo de la segunda tequilera, aunque el pH empezó también en 3.5, a los 28 días apenas se registró un valor de 3.7 en comparación a 4.6 para las muestras de la tequilera "La Cofradía". Al final del compostaje el valor de pH fue de 5.8. Como podrá observarse también en esta figura, entre las dos muestras de composta de ambas tequileras, en los primeros 28 días, en las pilas de composta de "La Regional" se presentó una etapa de acidificación por la probable producción de ácidos orgánicos, este fenómeno probablemente ocurrió por falta de oxigenación. La formación microbiológica de ácidos y la descomposición de éstos, depende del nivel de oxígeno y la temperatura. A mayores concentraciones de oxígeno, menores concentraciones de ácidos con un aumento más rápido de pH (Beck-Friis *et al.* 2001). Probablemente la formación y acumulación de ácidos

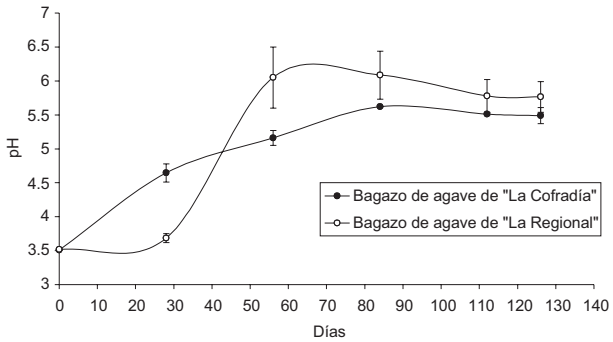

Fig. 7. Cambios en el pH durante el compostaje de bagazo de agave de dos fábricas de tequila. Valores expresados como la media de las dos pilas ± la desviación estandar

orgánicos no se manifestó tan marcadamente en las pilas de "La Cofradía", como en las de "La Regional" debido a que el bagazo de "La Cofradía", al inicio del compostaje, tenía una densidad de campo de 90.6 kg m^3 mientras que el bagazo de "La Regional" tenía una densidad de 123.9 kg m^3 lo que pudo facilitar una mejor aireación pasiva en toda la pila.

Análisis granulométrico

La **figura 8** presenta el análisis granulométrico realizado a las dos compostas, productos del bagazo de agave de las dos tequileras estudiadas y su comparación con la turba (*Sphagnum*); la cual es el sustrato mundialmente utilizado (Puustjarvi 1994, Abad *et al*. 2005). Los porcentajes en peso de las dos compostas no mostraron grandes diferencias, como tampoco existieron frente a la turba. El 97.5 % de las partículas se encontraron distribuidas casi uniformemente entre las aberturas 4.7 y 0.25 cm, con muy pocos finos y partículas retenidas en la malla con abertura de 0.1 cm, ya que entre estas dos categorías de partículas, apenas se recolectó el 1.5 y 3.7 % para las compostas de "La Cofradía" y "La Regional". Al respecto, diversos autores como: Raviv *et al*. (1986), Bunt (1988) y Handreck y Black (1991) indican que el tamaño de las partículas de los sustratos afecta al crecimiento de la planta a través del tamaño de los poros y que la distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido de agua y aire del sustrato a cualquier nivel de humedad. Así también Raviv *et al*. (1986) y Puustjarvi (1994), definen al mejor sustrato como aquel material de textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 y 2.5 mm, el cual retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire. Estas ase-

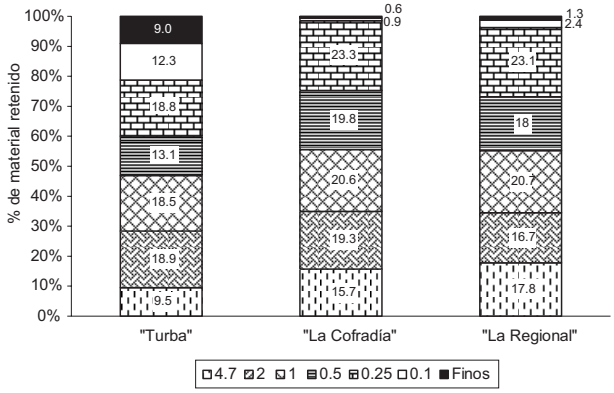

Fig. 8. Clasificación por tamaño de partículas (según la abertura de la malla en cm) de "turba" y composta de bagazo de agave de dos

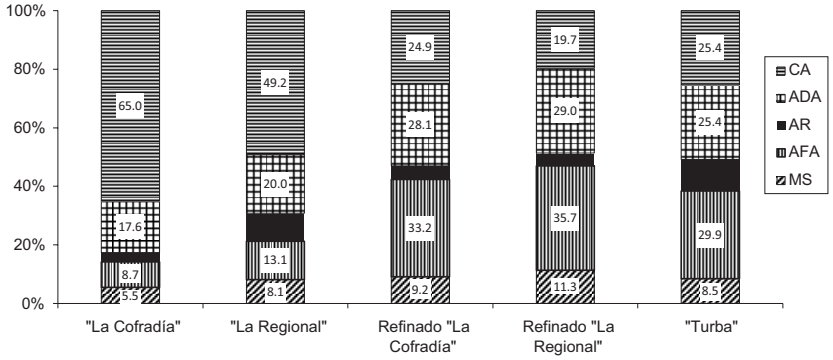

Fig. 9. Propiedades físicas de diferentes materiales analizados: porcentaje de volumen de material sólido (MS), agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva (AR), agua difícilmente asimilable (ADA) y capacidad de aire

veraciones fortalecen los resultados obtenidos en las compostas de ambas tequileras, las cuales podrán ser utilizadas como sustratos para cultivos sin suelo similar a lo que se hace con la turba *Sphagnum*, pero con un manejo del fertiriego diferente ya que la turba posee mayor porcentaje de partículas finas que las compostas estudiadas.

Características hidrológicas

La **figura 9** presenta algunas características hidrológicas de diferentes materiales analizados en términos de volumen de material sólido (MS), agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva (AR), agua difícilmente asimilable (ADA) y capacidad de aire (CA). De los 5 materiales analizados, la composta de "La Cofradía" fue la que tuvo una mayor capacidad de aire (65 %) seguida por la composta de "La Regional" (49.2 %). Sin embargo el haber refinado las compostas de "La Cofradía" y "La Regional" para abrir el material fibroso trajo como consecuencia que éstas adquirieran características hidrológicas muy similares a la turba, resultados interesantes que habría que tomar en cuenta en estudios posteriores al querer tomar estos materiales como sustitutos de la turba.

Brote y vigor relativo. De acuerdo con la metodología de bioensayos cualitativos para la evaluación de madurez de compostas en términos de brote, resultó que, para las compostas de ambas tequileras, se tuvieron resultados de compostas muy maduras para las pilas 1 y 2 de la tequilera "La Cofradía" y para la pila 1 de la tequilera "La Regional". El brote para las pilas 1 y 2 de "La Cofradía" fue del 100 y 94% mientras que, para la composta de la pila 1 de "La Regional", el brote fue del 100%. Según la técnica de evaluación (TMCC, 2001. Método 05.05-A), un subtrato a base de composta y vermiculita (mezcla al 50-50 % en volumen), con valores de brote mayores al 90 %, indica una composta muy madura, valores entre el 90-80 % una composta madura y valores menores al 80 % una composta inmadura. Según la referencia anterior, la composta de la pila 2 de la tequilera "La Regional" resultó ser como una composta madura ya que su valor de brote fue del 83 %. En cuanto a los análisis de vigor relativo los resultados indicaron que sólo la composta de la pila 1 de la tequilera "La Regional" resultó ser muy madura. La composta de la pila 2 y las de las pilas 1 y 2 de la tequilera "La Cofradía" resultaron ser compostas inmaduras por haber tenido resultados de vigor menores al 85 % ya que según los datos de referencia del TMCC (2001. Método 05.05-A) valores de vigor relativo, mayores al 95 %, indican compostas muy maduras, valores entre el 85-95 % compostas maduras y valores menores al 85 % indican compostas inmaduras. Sin embargo dos meses después, antes de realizar el estudio de campo con jitomate, se repitió la prueba vigor para las compostas de las cuatro pilas, resultando en este caso, valores de vigor para todas las compostas entre 85-95 %, lo que significó que las compostas ya podían considerarse como maduras. En algunos casos como en este, es importante para mejorar su calidad, que las compostas antes de ser utilizadas en la agricultura permanezcan estáticas un tiempo extra (tiempo de maduración) para dar oportunidad a que sucedan algunos cambios benéficos que sólo se dan a bajas temperaturas mesofílicas (Rynk 1992). Por otro lado no se registró brote alguno de semillas de pepino cuando se pusieron a germinar en bagazo de agave sin haber sido sometido al compostaje. En bagazo de agave sin cocción sino sólo "lavado" con agua caliente para extraer los azúcares fermentables, germinaron el 100 % de las semillas sembradas, lo que demuestra que durante el cocimiento de las cabezas de agave para hidrolizar los azúcares fermentables se forman melanoidinas, compuestos fitotóxicos (Sirianuntapiboon *et al.* 1988, Wedzicha y Maputo 1992, Kitts *et al.* 1993), que luego habrá que degradar a través del compostaje

CUADRO II. RELACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE DE PLANTAS DESARROLLADAS EN DIFERENTES SUSTRATOS

Producción	Sustrato			
	Composta de "La Cofradía"	Composta de "La Regional"	Estopa de coco	"Cocopeat"
Primer corte[1]				
Total de jitomates, g/planta	198.3[a]	165.5[a]	168.5[a]	184.0[a]
Jitomates de calidad, g/planta	86.0[b]	38.5[b]	87.0[b]	37.0
Peso del jitomate de calidad, g[*]	123.0	128.0	145.0	125.0
Segundo corte[2]				
Total de jitomates, g/planta	558.5[a]	406.0[a]	471.0[a]	368.0[a]
Jitomates de calidad, g/planta	309.0[b]	218.5[b]	298.0[b]	249.0[b]
Peso del jitomate, g	114.0	109.0	119.0	113.0
Tercer corte[3]				
Total de jitomates, g/planta	528.5[a]	786.5[a]	600.2[a]	621.5[a]
Jitomates de calidad, g/planta	380.5[b]	618.5[b]	420.0[b]	539.5[b]
Peso del jitomate, g	152.2	112.5	123.5	117.3
Cuarto corte[4]				
Total de jitomates, g/planta	1 366.5[a]	1 007.0[a]	1 331.5[a]	1 802.5[a]
Jitomates de calidad, g/planta	1 064.5[a]	744.0[a]	1 110.7[a]	1 488.0[a]
Peso del jitomate, g	208.7	169.1	222.1	240.5
Rendimiento total[5]				
Total de jitomates, kg/planta	2.652[a]	2.367 [a]	2.571[a]	2.976[a]
Jitomates de calidad, g/planta	1.850[a]	1.619[a]	1.916[a]	2.313[a]
Peso del jitomate, g	149.5	129.6	152.4	148.9

[1] Después de 55 días de haber transplantado la plántula.
[2] Siete días después del primer corte.
[3] Siete días después del segundo corte.
[4] Siete días después del tercer corte.
[5] En 21 días de cosecha.
[a, b] Valores con la misma letra en mismo renglón no difieren a $p \leq 0.5$ mediante el análisis por diferencia mínima significativa.
[*] Peso promedio según estándares de la compañía basados en color, diámetro y deformaciones.

para que el producto residual pueda ser utilizado con fines agrícolas.

Pruebas de campo

El **Cuadro II** presenta la relación de la producción de jitomate en los primeros cuatro cortes, después de 55 días de haber sido transplantadas las plántulas de jitomate en los substratos composta de "La Cofradía", composta de "La Regional", estopa de coco y "cocopeat". Como se puede observar en ninguno de los cuatro cortes ni al final de un período de cosecha de 21 días hubo diferencia estadística significativa (≤ 0.5) en los cuatro substratos utilizados, en cuanto al total de gramos de jitomates producidos por planta, así como en la calidad de los mismos (g/planta) evaluada por color, diámetro y deformaciones. Por lo anterior los resultados de este estudio pueden servir como base para intentar sustituir sustratos de importación, no sólo para la producción de jitomate sino también para otras hortalizas.

CONCLUSIONES

Se han realizado muchos trabajos sobre el compostaje de diferentes residuos orgánicos, pero sin embargo poco se ha publicado sobre el compostaje del bagazo de agave. Lo anterior a pesar de que la industria del tequila ha optado por este proceso para manejar el residuo lignocelulósico que se genera en grandes cantidades; siendo esto así este trabajo viene a contribuir con conocimientos para entender mejor el proceso estabilización del bagazo de agave. Por otro lado, se sabe que el compostaje es un proceso destructivo de la materia orgánica para convertirla en CO_2 y agua. En este trabajo se pretendió impedir la mineralización completa del bagazo de agave, para tratar de darle un valor agregado a través de la obtención de un producto que sirviera como sustrato para sustituir aquellos sustratos tradicionales en la producción de jitomate, logrando con esto, el objetivo principal del estudio.

REFERENCIAS

Abad M., Fornes F., Carrion C., Noguera P., Noguera V., Maquieira A. y Puchades R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. HortScience 40, 2138-2144.

AOAC (1984). *Official methods of analysis*. 14ª ed. Association of Official Analytical Chemist, Washington, DC. 952 pp.

Bertran E., Sort X., Soliva M. y Trillas I. (2004). Composting winery waste: sludges and grape stalks. Biores. Technol. 95, 203-208.

Beck-Friis B., Smars S., Jonsson H. y Kirchmann H. (2001). SE-structures and environment: gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. J. Agr. Eng. Res. 78, 423-30.

Bunt A. C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants*. 2a. ed. Unwin Hyman Ltd, Londres. 350 p.

Cedeño C.M. (1995). Tequila production. Crit. Rev. Biotechnol. 15, 1-11.

Charnay F. (2005). Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement. Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Francia. 277 pp.

CRT (2008). Consejo Regulador del Tequila. http://www.crt.org.mx. 15/05/2009.

CWMI (1976). The science and engineering of composting. Monitoring compost pH. Cornell Waste Management Institute. http:/compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html. 02/08/2008.

De Boodt M., Verdonck O. y Cappaert I. (1974). Method for measuring the water release curve for organic substrates. Acta Hortic. 37, 2054-2062.

EFSA (2007). Opinion of the scientific panel on biological hazards on a request from the European Commission on the safety vis-à-vis biological risk of the mesophilic process of biogas and compost treatment of animal by-products (ABPs). European Food Safety Authority. EFSA J. 465, 1-16.

Geoering H.K. y Van Soest P.J. (1970). Forage fiber analysis. Apparatus, reagents, procedure and some applications. Agric. Handbook 379.ARS. USDA. Washington DC. 1-20 pp.

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.

Handreck, K.A y Black, N.D. (1991). *Growing media for ornamental plants and turf*. New South Wales University Press, Kensington, Australia, 401 pp.

Íñiguez G. Parra J. y Velasco P.A. (2006). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 8. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje. Rev. Int. Contam. Ambie. 22, 2, 83-93.

Íñiguez G., Acosta N., Martinez L., Parra J. y González O. (2004). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7. Compostaje del bagazo de Agave y vinazas tequileras, Rev. Int. Contam. Ambie. 21, 1, 37-50.

Íñiguez G., Flores S. y Martínez L. (2003). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 5. Biodegradación del material de descarne de la industria de curtiduría. Rev. Int. Contam. Ambie. 17, 2, 83-91.

Kitts D.D., Wu C.H., Stich H.F. y Powrie W.D. (1993). Effect of glucose-lysine Maillard reaction products on bacterial and mammalian cell mutagenesis. J. Agric. Food Chem. 41, 2353-2358.

Larney F.J. y Hao X. (2007). A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada. Biores. Technol. 98, 3221-3227.

Pagans E., Barrena R., Font X. y Sánchez A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. Chemosphere 62, 1534-1542.

Puustjarvi V. (1994). *La turba y su manejo en la horticultura*. Ediciones de Horticultura. S. L. Reus. España. 240 pp.

Raviv M., Chen Y. y Inbar Y. (1986). Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. En: *The role of organic matter in modern agriculture* (Y. Chen y Y. Avnimelech, Eds.) Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 257-287.

Ross M., García C. y Hernández T. (2006). A full-scale study of treatment of pig slurry by composting: Kinetics changes in chemical and microbial properties. Waste Manage. 26, 1108-1118.

Rynk R. (1992). *On-farm composting handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, publication 54, Ithaca NY, http://www.cfe.cornell.edu/compost/OnFarmHandbook/coverpg.html. 25/07/2008.

Sirianuntapiboon S., Somchai P., Ohmomo S. y Attampasampunna P., (1988). Screening of filamentous fungi having the ability to decolourize molasses pigments. Agr. Biol. Chem. 52, 387-392.

Sommer S.G. y Dahl P. (1999). Nutrient and carbon balance during composting of deep litter. J. Agr. Eng. Res. 74, 145-153.

Tiquia S.M. y Tam N.F.Y. (2000). Fate of nitrogen during composting of chicken litter. Environ. Pollut. 110, 535-41.

TMECC (2001). Test methods for the examination of composting and compost. http://tmecc.org/tmecc. 25/08/2008.

Wedzicha B.L. y Kaputo M.T. (1992). Melanoidins from glucose and glycine: composition, characteristics and reactivity towards sulphite ion. Food Chem. 43, 359-367.

Willson G.B. (1989). Combining raw materials for composting. BioCycle 30, 82-83.

WHO (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4. Excreta and greywater use in agriculture*. Ginebra, World Health Organisation.

Zucconi F. y de Bertoldi M. (1987). Composts specifications for the production and characterization of composts from municipal solid waste. En: *Compost: quality and use* (M. de Bertoldi, M. P. Ferranti, P. L`Hermite y F. Zucconi, Eds.). Elsevier Applied Science. Londres, pp. 30-50.