

Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje

Pedro Bueno Márquez¹, Manuel Jesús Díaz Blanco¹ y Francisco Cabrera Capitán²

¹Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica. Universidad de Huelva. Facultad de Ciencias Experimentales. Campus El Carmen. 21071. Huelva.

² Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), CSIC. Reina Mercedes, 10, 41012 Sevilla.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de degradación biológica de residuos orgánicos está documentado desde el siglo I d.C. (Holgado y col, 1988). Desde entonces, los agricultores han seguido esta práctica (degradación natural) utilizando el producto resultante como abono. Los productos así obtenidos no siempre conservaban su potencial nutritivo debido a la falta de control sobre el proceso. Actualmente (Helynen, 2004; Fitzpatrick y col., 2005), el control, tanto del proceso de producción (compostaje) como del producto final (compost) se hace necesario para asegurar una óptima calidad y mínimos costes.

El compostaje se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios (Haug, 1993), que actúan de manera sucesiva, sobre la materia orgánica original, en función de la influencia de determinados factores, produciendo elevadas temperaturas, reduciendo el volumen y el peso de los residuos y provocando su humificación y oscurecimiento (Nakasaki, 2005). Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana y, por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica (Cronje y col, 2003). El hecho de que el compostaje sea biooxidativo exige una condición biológica que lo hace diferente de procesos físicos y químicos, así como de aquellos que no se realicen de forma aeróbica. También se ha de diferenciar entre el compostaje, como proceso controlado, de los procesos naturales no controlados que suelen desembocar en anaerobiosis más o menos acusadas. Al estar regidas estas reacciones por los ciclos biológicos de los microorganismos que intervienen en ellas, el compostaje requiere un tiempo mínimo. Por tanto, un compostaje que pretenda la obtención de un producto final útil como fertilizante (material orgánico estabilizado) no se puede dejar transcurrir espontáneamente, sino que en él han de controlarse las variables necesarias para garantizar la total terminación del proceso en un tiempo corto y con unos costes mínimos (Hedegaard y col, 1996; De Bertoldi y col, 1985; Körner y col, 2003).

Las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje pueden ser clasificados en dos tipos de parámetros en los que hay que establecer un control: parámetros de seguimiento (aquellos que han de ser medidos, seguidos durante todo el proceso y adecuados, en caso de ser necesario, para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos para cada fase del proceso (Jeris y col, 1973)) y parámetros relativos a la naturaleza del sustrato (aquellos que han de ser medidos y adecuados a su valores correctos fundamentalmente al inicio del proceso (Madejón y col, 2001)). Entre los parámetros de seguimiento se encuentran: temperatura, humedad, pH, aireación y espacio de aire libre. Entre los relativos a la naturaleza del sustrato: tamaño de partícula, relaciones C/N y C/P, nutrientes, materia orgánica y conductividad eléctrica. Los valores o intervalos óptimos están influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar y el sistema de compostaje elegido.

2. PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO

2.1. Temperatura

Al disponerse el material que se va a comportar en pilas, en un reactor, etc., si las condiciones son las adecuadas, comienza la actividad microbiana. Inicialmente todo el material está a la misma temperatura, pero al crecer los microorganismos se genera calor aumentando la temperatura. El síntoma más claro de la actividad microbiana es el incremento de la temperatura de la masa que está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang y col. 2003; Miyatake y col., 2006). La evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, pues se ha comprobado que pequeñas variaciones de temperatura afectan más a la actividad microbiana que pequeños cambios de la humedad, pH o C/N.

Por la evolución de la temperatura se puede juzgar la eficiencia y el grado de estabilización a que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica. Asimismo, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. A veces la temperatura puede llegar a ser tan alta que inhibe el crecimiento de los propios microorganismos, conociéndose este fenómeno como *suicidio microbiano*.

Se observan tres fases en el proceso de descomposición aeróbica: fase mesófila inicial ($T < 45^{\circ}\text{C}$), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; fase termófila ($T > 45^{\circ}\text{C}$); y fase mesófila final, considerándose finalizado el proceso cuando se alcanza de nuevo la temperatura inicial.

Cada especie de microorganismo tiene un intervalo de temperatura óptima en el que su actividad es mayor y más efectiva: $15\text{-}40^{\circ}\text{C}$ para los microorganismos mesófilos y $40\text{-}70^{\circ}\text{C}$ para los termófilos (Suler y col, 1977). Los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica del residuo, produciéndose un desprendimiento de calor. Este calor provoca una variación de la temperatura de la pila que dependerá de la adecuación de los demás factores a los intervalos óptimos, del tamaño de la pila (el calor generado es proporcional al volumen o masa de la pila, pero la pérdida es proporcional a la superficie), de las condiciones ambientales y del tipo de adición de aire a la pila, ya sea con volteos o con aire a presión (Ekinici y col, 2004). Las Figuras 4.1 a y 4. 1 b muestran la evolución de la temperatura en pilas estáticas con aireación forzada y en pilas volteadas respectivamente.

2.2. Humedad

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células y de los productos de deshecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso. Algunos autores (Haug, 1993; Madejón y col, 2002; Jeris y col, 1973) consideran que la humedad de los materiales es la variable más importante en el compostaje y ha sido calificada como un importante criterio para la optimización del compostaje.

La importancia de una humedad apropiada fue demostrada por Shulze (1962). Este autor estudió la variación de la cantidad de oxígeno consumido por una masa inicial durante el compostaje, en un reactor cerrado a una temperatura constante, en función de la humedad. Pequeñas variaciones de humedad provocaban grandes cambios en la temperatura.

La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa (Miyatake y col., 2006), para que permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aerobias), como la de otros gases producidos en la reacción.

La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; por encima del 70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciéndose una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso.

El exceso de humedad puede ser reducido con una mayor aireación (Haug, 1993). A su vez, con un buen control de la humedad y de la aireación, puede llevarse a cabo el control de la temperatura. Esto es debido a que durante el proceso de compostaje se debe llegar a un equilibrio entre los huecos entre partículas (de tamaño variable) que pueden llenarse de aire o de agua. Por lo tanto, la humedad óptima depende del tipo de residuo; así se ha encontrado que, para la paja de cereales está entre 75 y 85%, para astillas de madera entre 75 y 90% y para residuos sólidos urbano (RSU) entre 50 y 55% (Haug, 1993).

2.3. pH

El pH tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. En muchos trabajos se usa esta variable para estudiar la evolución del compostaje. Sin embargo, su medida, que se realiza en el laboratorio sobre el extracto acuoso de las muestras tomadas en las pilas, es sólo una aproximación del pH "*in situ*" (Sundberg y col, 2004). Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH.

Según algunos autores la evolución del pH en el compostaje presenta tres fases (Figura 4.2). Durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. Eventualmente, esta bajada inicial del pH puede ser muy pronunciada si existen condiciones anaeróbicas, pues se formarán aún más cantidad de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, 2001). Y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón.

Suler y col (1977) establecieron una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla, concluyendo que un compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8; valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. Posteriormente estos mismos autores estudiaron las relaciones pH-aireación-microorganismos existentes en el proceso, y dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos, por lo que si el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición.

2.4. Aireación

Para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que en él intervienen son aerobios. Las pilas de compostaje presentan porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus espacios libres: la parte más externa contiene casi tanto oxígeno como el aire (18-20%); hacia el interior el contenido de oxígeno va disminuyendo, mientras que el de dióxido de carbono va aumentando, hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0,5 y 2% (Ekinci y col, 2004).

Una aireación insuficiente provoca una sustitución de los microorganismos aerobios por anaerobios, con el consiguiente retardo en la descomposición, la aparición de sulfuro de hidrógeno y la producción de malos olores (Bidlemaier, 1996). El exceso de ventilación podría provocar el enfriamiento de la masa y una alta desecación con la consiguiente reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006).

La aireación es una variable de operación muy importante y la que más incide en los costes de operación, ya que suponen el 32-46% de los costes totales. La medida de la concentración de oxígeno requiere equipos costosos, pero puede también realizarse de una manera indirecta mediante las medidas de temperatura y humedad (Kulcu y col, 2004).

Durante el proceso de maduración no deben hacerse aportaciones adicionales de oxígeno, ya que una excesiva aireación podría dar lugar a un consumo de los compuestos húmicos formados y a una rápida mineralización de los mismos (Tomati y col., 2000).

2.5. Espacio de aire libre

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para satisfacer las necesidades fisiológicas de los microorganismos, ya que el agua es el medio de transporte tanto de las sustancias que sirven de alimento a las células, como de los productos de deshecho de la reacción (Hoitink y col., 1995). La humedad (contenido en agua) de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa y permita la circulación tanto del oxígeno (ya que el proceso debe desarrollarse en condiciones aeróbicas), como de otros gases producidos en la reacción.).

Shulze (1962) utiliza por primera vez el concepto de Espacio de Aire Libre (Free Air Space, FAS), adoptado de la ciencia del suelo, que relaciona los contenidos de humedad (H), la densidad aparente (Da), la densidad real (Dr) y la porosidad (P), es decir, que tiene en cuenta la estructura física de los residuos. El FAS, calculado por la Ecuación 4.1-4.3, da idea de las cantidades relativas de agua y aire existentes en la masa en compostaje.

$$FAS = P \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad (\text{Ecuación 4.1}), \text{ donde } P = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right) \quad (\text{Ecuación 4.2}), \text{ por tanto}$$

$$FAS = 100 \left(1 - \frac{Da}{Dr} \right) \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

En ambas expresiones FAS, P y H se expresan en % y Dr y Da en g cm⁻³).

Jeris y Regan (1973) estudiando diferentes residuos, establecieron que el proceso de compostaje ocurría con mayor rapidez (mayor consumo de oxígeno) cuando el valor de FAS era 30-35%, independientemente de la naturaleza del residuo.

Por lo tanto, conocidos los valores de D_a y D_r puede ser encontrada la humedad óptima para el residuo estudiado. La densidad real es una constante para cada producto. Por otro lado, en una pila de compostaje, la D_a puede aumentar o disminuir dependiendo del grado de humedad de la mezcla. Cuando la humedad es alta, disminuye el FAS y el producto se compacta, mientras que a valores bajos de humedad los espacios intersticiales están ocupados por aire, y la densidad aparente aumenta. Con objeto de reproducir en lo posible las condiciones de las pilas de compostaje y calcular la humedad idónea, se ha de determinar D_a a distintos grados de humedad.

3. PARÁMETROS RELATIVOS A LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

3.1. Tamaño de partícula

El tamaño inicial de las partículas que componen la masa a compostar es una importante variable para la optimización del proceso, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Por lo tanto, el desmenuzamiento del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso. Se ha descrito en una experiencia con residuos agroindustriales que la velocidad del proceso se duplicaba al moler el material. Pero aunque un pequeño tamaño de partícula provoca una gran superficie de contacto para el ataque microbiano, también se reduce el espacio entre partículas y aumenta las fuerzas de fricción (Haug, 1993); esto limita la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior, lo cual restringe la proliferación microbiana y puede dar lugar a un colapso microbiano al ser imposible la aireación por convección natural. Por otra parte, un producto muy fino no es aconsejable por riesgos de compactación.

Las dimensiones consideradas óptimas son distintas según los criterios de distintos autores, variando entre 1 y 5 cm (Haug, 1993), entre 2 y 5 cm (Kiehl, 1985) o entre 2,5 y 2,7 cm (Tchobanogolus y col., 1994).

3.2. Relaciones C/N y C/P

Para un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, la relación C/N del material de partida debe ser la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35 (Jhorar y col, 1991).

La relación C/N es un importante factor que influye en la velocidad del proceso y en la pérdida de amonio durante el compostaje; si la relación C/N es mayor que 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso, debido a la deficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica de los microorganismos. Para eliminar el exceso de carbono (en forma de anhídrido carbónico) es necesaria la aparición sucesiva de diversas especies microbianas. Al morir estos microorganismos el nitrógeno contenido en su biomasa se recicla y la relación C/N tiende a disminuir. Si el residuo tiene una alta relación C/N, pero la materia orgánica es poco biodegradable, la relación C/N disponible realmente para los microorganismos es menor y el proceso evolucionará rápidamente, pero afectará sólo a una proporción de la masa total. Si la relación C/N es muy baja el compostaje es más rápido pero el exceso de nitrógeno se desprende en forma amoniacal, produciéndose una autorregulación de la relación C/N del proceso.

La relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10, similar a la del humus. En la práctica, se suele considerar que un compost es suficientemente estable o maduro cuando $C/N < 20$ aunque esta es una condición necesaria pero no suficiente. Si los productos que se compostan poseen una relación C/N baja (inferior a 18-19), el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez (Golueke y col., 1987; Zhu, 2006), pero se desprende como amoníaco el exceso de N, produciéndose una autorregulación de la relación C/N (Jhorar y col., 1991). Estas pérdidas, si bien no afectan negativamente al compostaje, suponen un derroche, porque el N es el nutriente fundamental para los cultivos, así como un problema medioambiental (Hedegaard y col., 1996) ya que el amoníaco es un gas con un considerable efecto invernadero. Al tener la relación C/N una gran dependencia de la riqueza inicial de N, un valor concreto de C/N no refleja el estado de madurez de un compost, por lo que es más indicado seguir la evolución de C/N del proceso o calcular la diferencia entre los valores iniciales y finales. En la Figura 4.3 se muestra la evolución característica de la relación C/N durante y después del compostaje (Kiehl, 1985).

Por otra parte, el fósforo es el nutriente más importante, tras el C y el N, por lo que también debe estar presente en unas cantidades mínimas para que el proceso se lleve a cabo correctamente. Una buena relación entre los principales nutrientes provoca una adecuada capacidad para la proliferación microbiana, al tener todos los nutrientes principales en unas cantidades óptimas y en la forma más disponible para la síntesis microbiana. Singh y Amberger (1990) encontraron que cuando compostaban paja de trigo en presencia de roca fosfática, la descomposición de la paja aumentaba al hacerlo la cantidad de fósforo añadido. La relación C/P para el compostaje es óptima entre 75 y 150, mientras que la relación N/P debe estar entre 5 y 20.

3.3. Nutrientes

La característica química más importante de los sustratos es su composición elemental. La utilidad agronómica de los residuos con posibilidad de ser compostados está en función de la disponibilidad de los elementos nutritivos que posean (Kiehl, 1985). Los microorganismos sólo pueden aprovechar compuestos simples, por lo que las moléculas más complejas se rompen en otras más sencillas (por ejemplo las proteínas en aminoácidos y estos en amoníaco) para poder ser asimiladas (Castaldi y col., 2005).

Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N, y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. El carbono es necesario en la síntesis celular para la formación del protoplasma, así como la de los lípidos, grasas y carbohidratos; durante el metabolismo se oxida para producir energía y anhídrido carbónico; es el elemento que debe estar presente en mayor cantidad puesto que constituye el 50% de las células de los microorganismos y el 25% del anhídrido carbónico que se desprende en la respiración. El nitrógeno es un elemento esencial para la reproducción celular debido a la naturaleza proteica del protoplasma; se ha demostrado que la calidad de un compost como fertilizante está directamente relacionada con su contenido de N. El fósforo desempeña un papel fundamental en la formación de compuestos celulares ricos en energía, siendo necesario para el metabolismo microbiano.

Se comprueba que, en general, entre el inicio y el final de la incubación se produce un aumento de las concentraciones de los distintos nutrientes, debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar (Díaz y col., 2004, Michel y col., 2004).

Además de C, N y P existen otros nutrientes presentes en menor cantidad (micronutrientes). Estos tienen un importante papel en la síntesis de las enzimas, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intra y extracelular (Miyatake y col., 2006).

3.4. Materia orgánica

El conocimiento del contenido de los composts en materia orgánica es fundamental, pues se considera como el principal factor para determinar su calidad agronómica (Kiehl, 1985). Durante el compostaje la materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma de anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi y col, 1987). Este descenso de materia orgánica transcurre en dos etapas fundamentalmente. En la primera se produce un rápido decrecimiento de los carbohidratos, transformándose las cadenas carbonadas largas en otras más cortas con la producción de compuestos simples; algunos de los cuales se reagrupan para formar moléculas complejas dando lugar a los compuestos húmicos. En la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos lábiles, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y/o transformando en compuestos húmicos (Tomati y col., 2000; Castaldi y col, 2005); generalmente este último cambio no finaliza durante el tiempo que dura el compostaje. Algunos compuestos procedentes de la materia orgánica son utilizados por los microorganismos para formar sus tejidos y otros son transformados en anhídrido carbónico y agua. Los nuevos materiales formados poseen unas propiedades distintas a las de los materiales originales, confiriéndole a la masa unas características físicas y químicas distintas (Haug, 1993). La velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisico-químicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH) (Michel y col., 2004).

Tanto las pérdidas de peso por mineralización de la materia orgánica, como las de otros nutrientes durante el compostaje, pueden ser evaluadas mediante un balance de materia. En la Figura 4.4 se presenta un diagrama del balance de materia durante el compostaje de la cual se puede deducir la ecuación 4.4..

En el balance total:

$$OI + II + H_2O-I + H_2O-E + AE = OF + IF + H_2O-F + H_2O-S + CO_2-S + NH_3-S + NS \quad (\text{Ecuación 4.4}),$$

donde...

En ella se puede conocer H_2O-E , la masa total de entrada ($OI + II + H_2O-I$) y la masa total de salida ($OF + IF + H_2O-F$), y el resto de los componentes ($AE, H_2O-S, CO_2-S, NH_3-S$), por lo tanto, se puede calcular a partir de las composiciones elementales a la entrada y a la salida del producto.

Para predecir la cantidad de producto final ($OF+IF$) es necesario conocer la biodegradabilidad de la materia orgánica de partida. La biodegradabilidad indica la cantidad de materia orgánica que puede descomponerse, o que se ha descompuesto, de una mezcla o de un producto determinado. La biodegradabilidad es por tanto una medida de la degradabilidad de un sustrato (Tchobanoglous *et al.*, 1994). El paso limitante en el proceso de compostaje de algunos residuos industriales es la rotura de las cadenas hidrocarbonadas de la celulosa (Haug, 1993). Según este autor en un periodo de unos 200 días se degrada entre un 23-54% de la celulosa, dependiendo de la mezcla; las celulosas y hemicelulosas son fácilmente degradables, los compuestos lipídicos tienen una degradabilidad limitada y las ligninas no se degradaban en absoluto. En la Tabla 4.1 se muestra la degradabilidad de algunos componentes de los residuos orgánicos.

La biodegradabilidad puede estimarse mediante un balance de materia, teniendo en cuenta que la cantidad de cenizas se conserva constante durante el compostaje. Se define un coeficiente de degradación (K_b ; Ecuación 4.5 (Haug, 1993) a partir de la concentración de cenizas o de materia orgánica al inicio y al final del compostaje.

$$K_b = \frac{[(C_f - C_i) 100]}{[C_f (100 - C_i)]} \quad (\text{Ecuación 4.5}),$$

donde C_i y C_f son el porcentaje de cenizas al inicio y al final del compostaje respectivamente.

Utilizando, en lugar de los porcentajes de cenizas, los de MO al inicio (MO_i) y al final del compostaje (MO_f), resulta:

$$K_b = \frac{[(MO_i - MO_f) 100]}{[MO_i (100 - MO_f)]} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

3.5. Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y en menor grado por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero, 2001).

La CE tiende generalmente a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica, hecho que produce un aumento de la concentración de nutrientes. Ocurre a veces un descenso de la CE durante el proceso, lo que puede deberse a fenómenos de lixiviación en la masa, provocados por una humectación excesiva de la misma.

La dosis de compost que puede añadirse a un suelo debe ser proporcional a la CE del compost. Un exceso de salinidad en la solución del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas, de modo que en algunos casos, en esas condiciones, sólo prosperan las especies resistentes.

4. Bibliografía

- Bidlingmaier, W. 1996. Odour emissions from composting plants. En: De Bertoldi, M.; Sequi, P.; Lemmes, B., Papi, T. (Eds.). *The Science of Composting*, Vol I, pp. 71-79. Blackie Academic & Professional, London.
- Castaldi P., Alberti G., Merella R., Melis P. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manag.*, 25: 209-213.
- Cronje, A., Turner, C., Williams, A. 2003. Composting under controlled conditions. *Environ. Technol.* 24 (10): 1221-1234.
- De Bertoldi, M.; Vallini, G., Pera, A. 1985. Technological Aspects of composting including Modelling and Microbiology. En: J.K.R. Gasser (Ed.). *Composting of Agricultural and other wastes*, pp: 27-40. Elsevier Applied Science Publishers, Bruselas,
- Díaz, M.J., Jiménez, L., Cabrera, F., De Bertoldi, M. 2004. Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Sci. Util.*, 12 (3): 273-279.

- Ekinci, K., Keener, H.M., Elwell, D.L. 2004. Effects of aeration strategies on the composting process: Part I. Experimental studies. *Trans. ASAE*, 47 (5): 1697-1708.
- Fitzpatrick, G.E., Worden, E.C., Vendrame, W.A. 2005. Historical development of composting technology during the 20th century. *Horttechnology*, 15 (1): 48-51.
- Golueke, C.G., Diaz, L.F. 1987. Composting and the Limiting Factors Principle. *Biocycle*, 28 (4): 22-25.
- Haug, R.T. 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers. Boca Raton. Florida.
- Hedegaard, M., Krüger, I. 1996. Composting of agricultural wastes in Denmark in respect of potential, industrial process technology and environmental considerations. En: De Bertoldi, M.; Sequi, P.; Lemmes, B., Papi, T. (Eds.). *The Science of Composting, Vol I*, pp. 691-697. Blackie Academic & Professional, London.
- Helynen S. 2004 Overview of European Policies and Directives aimed at promoting energy from wood biomass Future Issues for Forest Industries in Europe, 28 April - 1 May, Dublin, Ireland.
- Hoitink, Harry A. J.; Tseng, David Y.; Chalmers, Jeffrey J.; Tuovinen, Olli H.. 1995. Characterization of a Bench-Scale System for Studying the Biodegradation of Organic Solid Wastes. *Biotechnol. Progress*, 11(4), 443-51.
- Holgado, A. 1988. Columela, L.J.M. -De los trabajos de campo. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Ed. Siglo XXI de España, Madrid.
- Jeris, J.S., Regan, R.W. 1973. Controlling Environmental Parameters for Optimun Composting. Part II, *Compost Sci.* 14 (March-April): 8-15.
- Jhorar, B.S.; Phogat, V., Malik E. 1991. Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest. Rehabil.*, 5: 297-306.
- Kiehl, F.J. 1985. *Fertilizantes orgânicos*. Editora Agronômica Ceres Ltda, São Paulo, .
- Körner I., Braukmeier J., Herrenklage J., Leikam K., Ritzkowski M., Schlegelmilch M., Stegmann R. 2003. Investigation and optimization of composting processes-test systems and practical examples. *Waste Manag.*, 23: 17-26
- Kulcu, R., Yaldiz, O. 2004. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Biores. Technol.*, 93 (1): 49-57.
- Liang C., Das K.C., McClendon R.W. 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Biores. Technol.*, 86 131-137.
- Madejón, E., Díaz, M.J., López, R., Cabrera, F. 2001. Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Biores. Technol.*, 76: 275-278.
- Madejón, E., Díaz, M.J., López, R., Cabrera, F. 2002. New approaches to establish optimum moisture content for compostable materials. *Biores. Technol.*, 85: 73-78.

- Michel, F.C., Pecchia, J.A., Rigot, J. 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.*, 12 (4): 323-334.
- Miyatake F., Iwabuchi K, 2006. Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Biores. Technol.*, 97: 961–965.
- Nakasaki, K., Nag, K. Karita, S. 2005. Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Manag. Res.* 23 (1): 48-56.
- Sánchez-Monedero M. A., Roig A., Paredes C. Bernal M. P. 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol.*, 78 (3): 301-308.
- Shulze, K.L. 1962. Continuous Thermophilic Composting. *Appl. Microbiol.*, 10: 108-122.
- Singh, C.P., Amberger, A. 1990. Humic substances in straw compost with rock phosphate. *Biol. Wastes*, 31: 165-174.
- Suler, D.J., Finstein, S. 1977. Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33 (2): 345-350.
- Sundberg, C., Smars, S., Jonsson, H. 2004. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Biores. Technol.*, 95 (2): 145-150.
- Tchobanogolus, G.; Theisen, H., Vigil, S. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. Ed. McGraw-Hill, Madrid, 1107p.
- Tomati, U., Madejon, E., Galli, E. 2000. Evolution of humic acid molecular weight as an index of compost stability. *Compost Sci. Util.*, 8 (2): 108-115.
- Zhu, N.W. 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Biores. Technol.* 97 (15): 1870-1875.
- Zhu, N.W., Deng, C.Y., Xiong, Y.Z. 2004. Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. *Biores. Technol.*, 95 (3): 319-326.
- Zucconi, F., De Bertoldi, M. 1987. Specifications for solid waste compost. *Biocycle* 28 (5/6): 56-61.

Tabla 4.1: Biodegradabilidad de los principales componentes orgánicos de los sustratos (Haug, 1993)

Componente	Degradabilidad (%)
Celulosas	70
Hemicelulosas	70
Otros Azúcares	70
Ligninas	0
Lípidos	50
Proteínas	50

Capítulo 4. Leyendas de la figuras

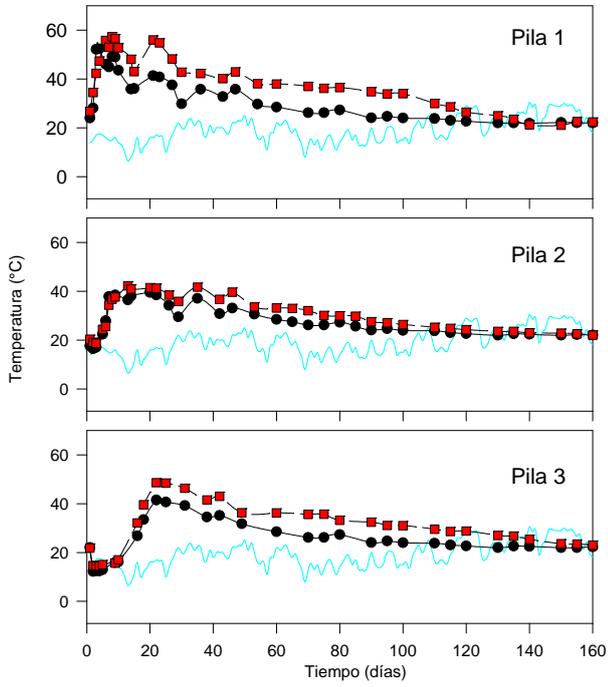
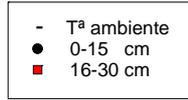
Figura 4.1. Evolución de mezclas de residuos orgánicos en pilas estáticas (a) y pilas volteadas (b).

Figura 4.2. Evolución del pH durante el proceso de compostaje.

Figura 4.3. Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje.

Figura 4.4. Representación esquemática del balance de materia en el compostaje.

a)



b)

