



CAPÍTULO

EL COMPOSTAJE COMO HERRAMIENTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS Y LA GESTIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO



Mauricio García Arboleda
Óscar Eduardo Sanclemente Reyes

6.1 INTRODUCCIÓN

El compostaje es una práctica que acompaña al hombre desde los inicios de las civilizaciones y ha venido refinándose de acuerdo con las diferentes actuaciones en el territorio. En este sentido, los materiales orgánicos excedentes de los diferentes procesos realizados por el hombre, en el marco del compostaje, han pasado de ser simples residuos a convertirse en verdaderos recursos.

En la actualidad existe una verdadera ciencia en torno al compostaje, en donde los materiales orgánicos utilizados han sido estudiados en su composición y con base en esto se gestiona la producción. Con la utilización de diferentes residuos de la agricultura, industria y derivados urbanos se realiza la gestión de habilitación en recursos para la agricultura y mejoramiento de los suelos a través del proceso de compostaje.

Esta técnica implica la mezcla adecuada de residuos con el fin de partir de un sustrato con características adecuadas en proporción de carbono/nitrógeno, carbono/fósforo y porcentaje de humedad, entre otros, de tal forma que se adecue a los requerimientos de poblaciones de microorganismos que mediante diferentes sucesiones poblacionales generen unas etapas térmicas necesarias para la disociación de contaminantes químicos, la selección de patógenos y la transformación gradual de macromoléculas a los primeros rudimentos de ácidos húmicos y fúlvicos como esencia de la materia orgánica estabilizada en un periodo de tiempo adecuado para la maduración.



La selección de patógenos y la transformación gradual de macromoléculas a los primeros rudimentos de ácidos húmicos y fúlvicos como esencia de la materia orgánica estabilizada en un periodo de tiempo adecuado para la maduración.

6.2 HISTORIA DEL COMPOSTAJE

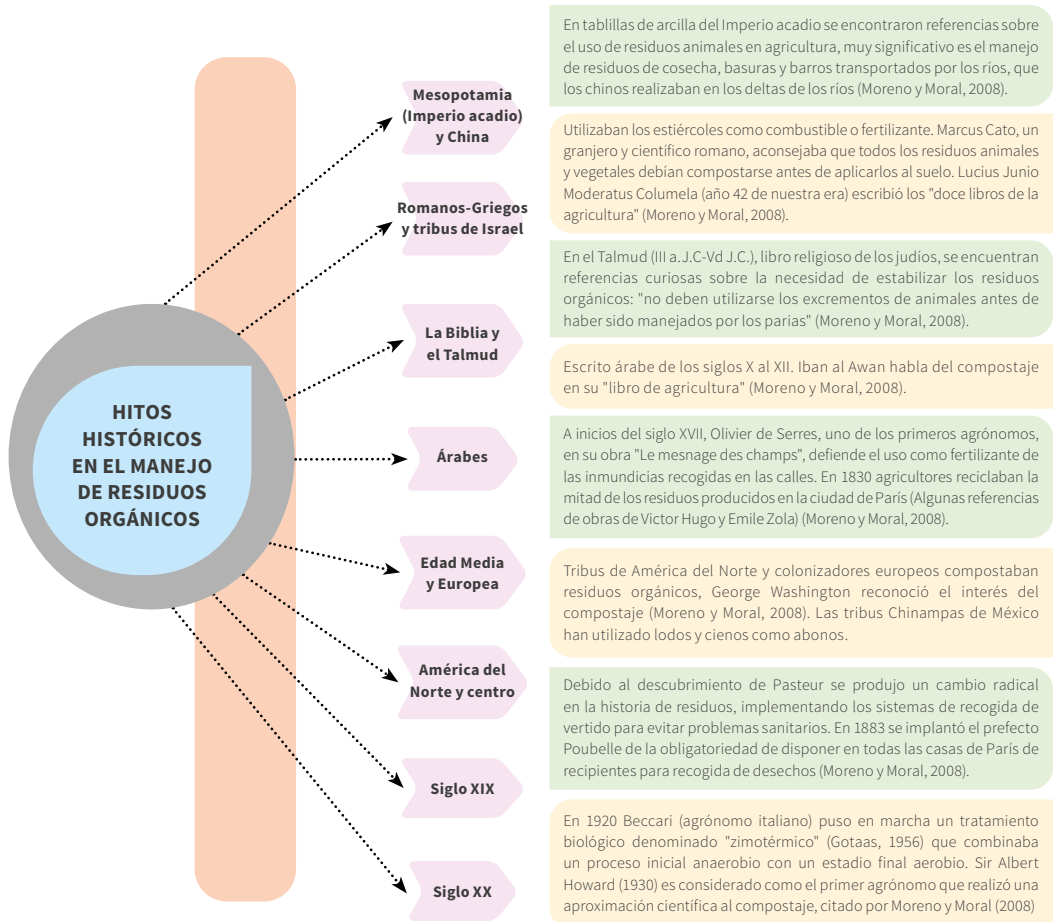
Los residuos han estado ligados a la historia de la humanidad y ambos han presentado grandes cambios después del siglo XIX. El compostaje ha venido evolucionando cíclicamente desde una concepción artística en la antigüedad hacia un estatus científico como respuesta a la sociedad moderna.

Los primeros indicios del compostaje pueden aparecer a partir de la agricultura en el tránsito del hombre nómada al sedentario, sin poder precisar una época o sociedad específica. Inicialmente, los residuos eran abandonados por motivo de desplazamiento de las sociedades nómadas y posteriormente se comenzó con alguna práctica como enterrada, quema, alimentación animal o disposición en procesos de precompostaje en las primeras expresiones sedentarias, en donde posiblemente los residuos orgánicos se constituyeron en herramienta para el manejo de los suelos en las civilizaciones antiguas.

Los primeros indicios del compostaje pueden aparecer a partir de la agricultura en el tránsito del hombre nómada al sedentario, sin poder precisar una época o sociedad específica.

El aumento del interés en Occidente en el compostaje se originó probablemente por una larga visita a principios del siglo del profesor F. H. King del departamento de agricultura de los EEUU a China, Japón y Korea, durante la cual registró cuidadosamente sus observaciones (Dalzell et al., 1991). El libro que recopila esta experiencia de King fue leído por Sir Albert Howard, que ensayó en la India las observaciones sobre el compostaje de King en China (figura 6.1).

FIGURA 6.1 *Hitos históricos del manejo de residuos orgánicos*



Fuente: Adaptado de otros autores

Como se expresó anteriormente, el agrónomo Albert Howard es considerado uno de los padres del compost, mediante la mezcla de paja, residuos vegetales, estiércol animal y su respectiva y correcta maduración para obtener un abono de excelente calidad. Mediante observación en campo, este hijo de un agricultor inglés basó su trabajo científico en botánica y compostaje, los cuales consigna en su obra Testamento agrícola para una agricultura natural, producto de sus trabajos en el estado de Indora (India) realizados desde 1873 hasta 1947. Howard llegó a concluir que imitando la naturaleza podría diseñar los compost y de esta forma realizar una fertilización adecuada de los campos. Esto lo logró mediante el análisis de la descomposición de la materia orgánica en selvas de la India, identificando al humus como nutriente esencial para las plantas.

El movimiento en torno a las enseñanzas de Albert Horward ha desembocado en la creación, en los países sajones, de los movimientos y las prácticas de la agricultura orgánica, el equivalente de la agricultura ecológica en nuestro país (Bueno, 1999).

6.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Para introducirnos en el mundo de compostaje es necesario conceptualizar los diferentes elementos que se manejan en la temática. Por lo tanto, se muestran a continuación algunos de ellos:

Residuo: se entiende como una sustancia u objeto de cualquier naturaleza cuyo poseedor no tiene intención u obligación de usarla y está interesado en desecharla.

Residuos urbanos o municipales: sustancias u objetos residuales generados en casas familiares, zonas comerciales, oficinas y empresas de servicios (exceptuando los calificados como residuos peligrosos) que proceden de zonas verdes, manejo y limpieza de zonas verdes, escombros de construcciones urbanas, maquinaria, vehículos y enseres abandonados.

Residuos biodegradables: materiales o sustancias residuales que, por su naturaleza o condiciones de disposición, pueden tener una descomposición aerobia o anaerobia. Ejemplo: residuos de podas de jardines y zonas verdes en general, residuos alimenticios, residuos de estiércoles animales, cartón y papelería.

Reutilización: utilización de un material o producto para la misma función que fue construido o producido originariamente.

Reciclado: clasificación y reutilización de los residuos en diferentes sistemas productivos de la sociedad para usos iguales a su diseño inicial o para otros fines como el compostaje, materiales metales, cartón y plásticos.

Valorización: mecanismos y procedimientos desarrollados para vislumbrar o aprovechar la potencialidad de los recursos inmersos en los residuos sin afectar la salud y el medio ambiente.

Existen variados tipos de residuos originados en los diferentes contextos de la sociedad que pueden ser potencialmente empleados en el proceso de compostaje (figura

6.2). Su uso dependerá de las características físicas y químicas, así como grado de disponibilidad.

FIGURA 6.2 Origen de los residuos sólidos



Fuente: Los autores

6.4 ASPECTOS TÉCNICOS DEL COMPOSTAJE

Como pudimos apreciar en la historia del compostaje a nivel mundial, el hombre ha venido generando una serie de lecturas de los acontecimientos en torno a los residuos en su entorno, que lo han llevado poco a poco a articular diferentes iniciativas para el manejo de los estos. En esta aproximación a dicho manejo se encuentran prácticas eminentemente empíricas, otras un poco más tecnificadas y otras altamente refinadas.

Bioquímica de los residuos: los materiales orgánicos, como se pudo apreciar en la figura 6.2, tienen diferentes orígenes y combinaciones de carbohidratos, proteínas, hemicelulosas, celulosa, lignina y minerales en amplios rangos de concentración (tabla 6.1). Los contenidos en el material vegetal dependerán de la edad de la planta, el tipo de material y medio ambiente.

TABLA 6.1 *Composición media de los vegetales*

Biomolécula	% Materia seca	Humus
Celulosa	20 - 50	2 - 10
Hemicelulosa	10 - 28	2 - 20
Lignina	10 - 30	35 - 55
Materias animadas	1 - 15	15 - 45
Diversos: grasas, taninos, ceras	1 - 8	1 - 8

Fuente: Adaptado de Gómez (2000)

A medida que las plantas envejecen tienden a retornar diferentes minerales de su constitución al suelo y los compuestos de bajo peso molecular se convierten en compuestos poliméricos de alto peso molecular tales como las hemicelulosas, la celulosa y la lignina. La composición de los desechos animales dependerá del tipo de animal y su alimentación (Dalzell et al., 1991). El proceso de compostaje es esencialmente una reorganización de la fracción de carbono de la materia orgánica.

Los compuestos orgánicos como azúcares, de forma simple y fácilmente soluble en agua, son rápidamente absorbidos por microorganismos, por lo que se suministra energía y se elaboran polímeros a partir de ellos. Otras moléculas de rápida descomposición son los compuestos nitrogenados a partir de proteínas y aminoácidos. Otras sustancias como celulosa o hemicelulosa tienen grandes moléculas, por lo tanto deben ser atacadas por enzimas antes de que puedan ser usadas y su grado de descomponibilidad es menor que el de las moléculas anteriores, por lo que dura más tiempo su descomposición.

La lignina es una macromolécula que se encuentra en ramas, raíces y tallos de árboles y se constituye en la mayor precursora de moléculas húmicas; de otra parte, su grado de descomponibilidad es mayor que los dos tipos de grupo de moléculas anteriores. Es fundamental expresar que la gestión de un compost en el suelo es mucho mejor en la medida que proceda de la descomposición de un mayor número de residuos (mayor

residuo-diversidad); por tanto, este aspecto debe tenerse en cuenta a la hora del diseño de la producción del compost.

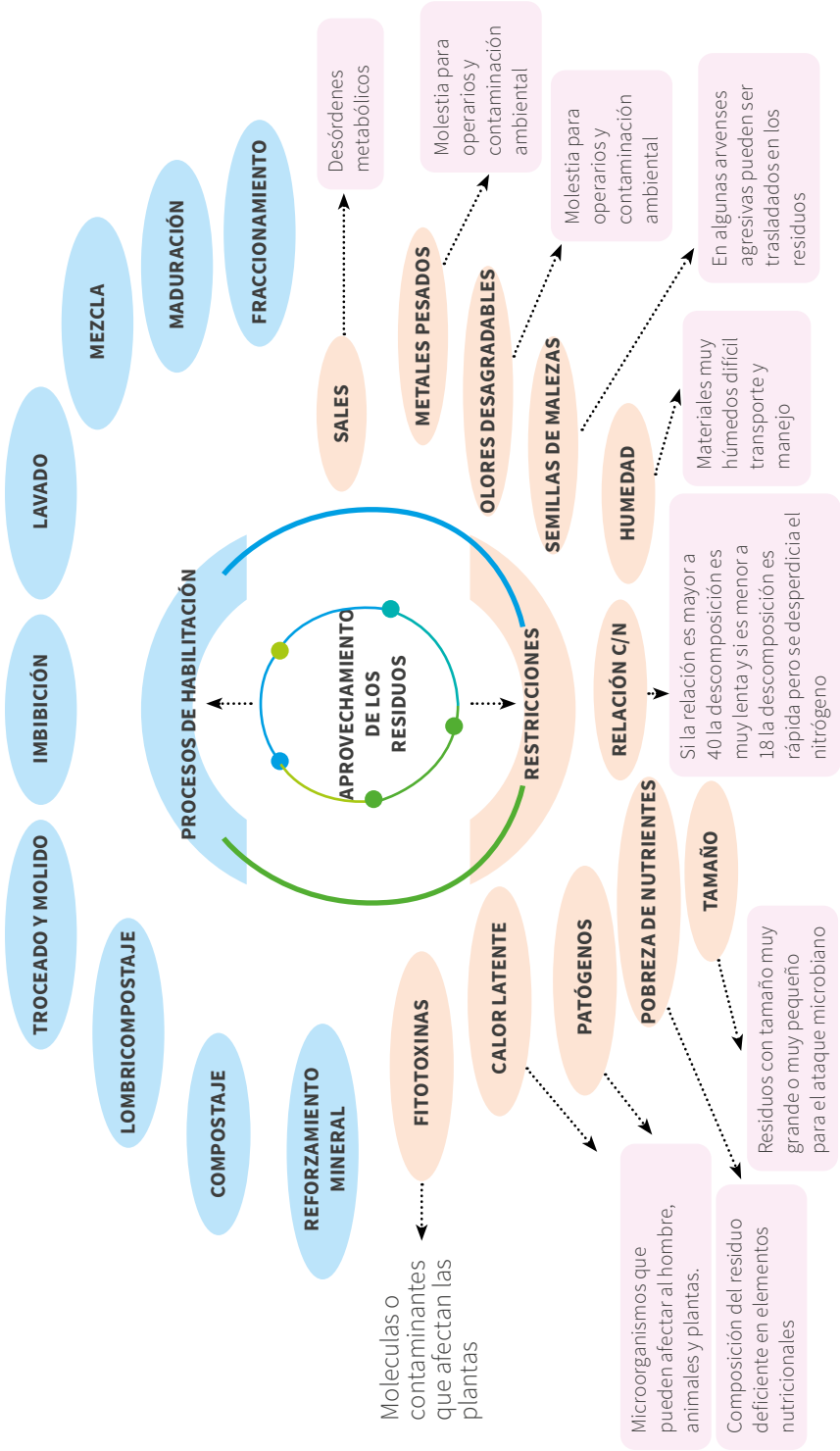
Para continuar con este marco conceptual es importante definir lo que es compostaje en su sentido estricto:

Compostaje: es un proceso aeróbico (biooxidativo) producto del accionar de variedad y cantidad de poblaciones de microorganismos en el interior de mezclas de materiales orgánicos sólidos con humedad adecuada, que requiere técnicamente un calentamiento denominado etapa termofílica debido a la dinámica microbial y la generación de toxinas naturales, lo cual genera agua, minerales y dióxido de carbono y la consecuente habilitación y estabilización de la materia orgánica de la matriz del sustrato para su ser usada en la agricultura (Gómez, 2000). Es una técnica de habilitación de los residuos, que imita la descomposición que sufren estos en la naturaleza (Valverde et al., 2020).

De acuerdo con lo anterior, en el compostaje se integra una dinámica microbial en función de diferentes residuos bajo un ambiente determinado en donde fluctúan la humedad, la temperatura y el pH, entre otros. Por tal razón, es importante establecer los diferentes factores químicos y físicos que se tienen en cuenta en el desarrollo de un proceso de compostaje.

Los residuos de diferente naturaleza relacionados en la figura 6.2 presentan diversas restricciones para su uso como insumos en la agricultura, razón por la cual la sociedad agropecuaria ha desarrollado un proceso para su adecuada habilitación (Gómez, 2000). Dentro de estos, el compostaje se constituye en una de las alternativas principales para dicha habilitación de residuos mediante su adecuada gestión, teniendo en cuenta aspectos de tamaño de los materiales, humedad y contenidos minerales de los mismos, de tal forma que el inicio del proceso cumpla con determinados requerimientos técnicos que aseguran el adecuado proceso de sucesiones microbiológicas y fases de maduración de la mezcla de materiales. En este sentido, se profundiza a continuación el proceso de compostaje (figura 6.3).

FIGURA 6.3 Restricciones y procesos de habilitación de los residuos



Fuente: Los autores (2019)

En la gestión de los sistemas de compostaje las variables más importantes son de dos tipos: las de seguimiento, que como su nombre lo indica se realizan durante todo el proceso y deben ser adaptadas a los requerimientos técnicos de cada fase del proceso y en segundo término las variables de naturaleza del sustrato, que deben estar en el rango adecuado al inicio del proceso de compostaje.

La humedad, temperatura, pH, aireación y espacios de aire libre son parámetros de seguimiento del compostaje mientras que la relación carbono: nitrógeno (C/N), carbono: fósforo (C/P), tamaño de partícula materia orgánica, nutrientes y conductividad eléctrica son variables o parámetros relacionados con la naturaleza del sustrato. En este sentido, las condiciones ambientales, el tipo de sustrato o residuo y la técnica de compostaje influyen en el valor o rango de los parámetros (Moreno y Moral, 2008).

6.5 PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO DEL COMPOSTAJE

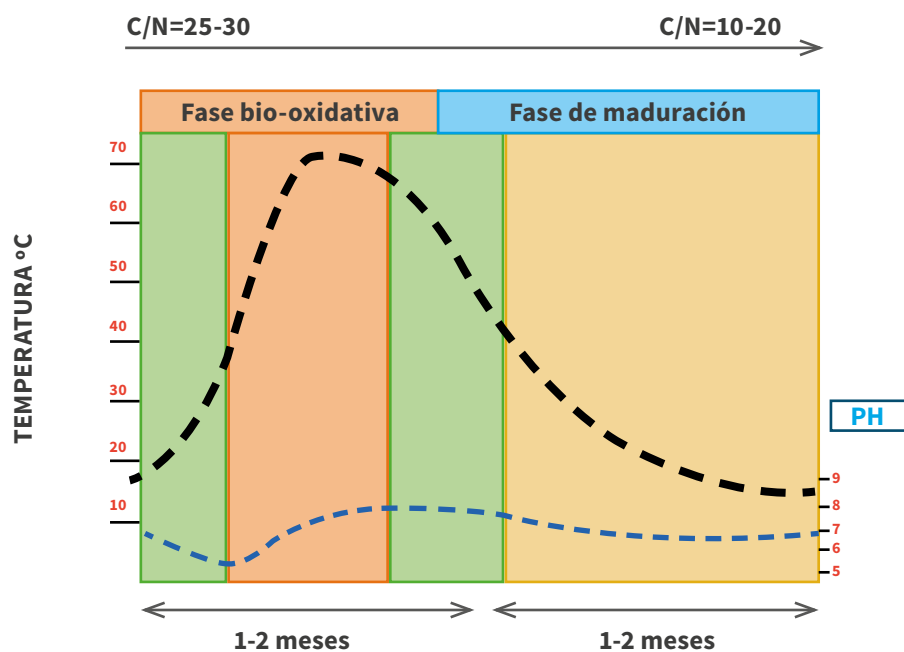
Temperatura: las diferentes poblaciones de microorganismos intervienen gestionando los materiales orgánicos y la energía inherente a ellos de manera que en unas condiciones determinadas de humedad y aireación del ambiente compostable generan un incremento en la temperatura. Se reconocen tres fases de temperatura en el proceso de compostaje: la fase mesófila inicial en donde la temperatura es menor a 45 °C; la fase termófila, cuya temperatura se encuentra en un rango de 50 a 60 °C y la fase mesófila final, periodo en el cual el proceso alcanza nuevamente la temperatura inicial (figura 6.4).

La temperatura es un parámetro importante en el proceso de compostaje; algunos científicos la consideran como la principal característica de dicho proceso en comparación con otros factores como el pH, la humedad y la aireación. Esto se debe a que la temperatura influye en diferentes aspectos de habilitación de los sustratos como la ruptura de enlaces de macromoléculas de la lignina, celulosa y hemicelulosa, por ejemplo; también influye en la dinámica sucesional de microorganismos según diferentes rangos de temperatura que se dan en cada una de las fases nombradas anteriormente, siendo la fase termofílica en donde mueren gran cantidad de microorganismos que en muchos casos pueden ser patógenos, lo que genera la habilitación microbial de los materiales orgánicos.

También influye en la disociación de moléculas contaminantes como insecticidas organofosforados, ditiocarbamatos, herbicidas y hormonas, entre otros. Es importante

anotar que en el seguimiento de este parámetro se recomienda no dejar sobrepasar el proceso por encima de los 70 °C puesto que se estaría generando desperdicio de elementos por volatilización excesiva.

FIGURA 6.4 Curva de temperatura y pH durante el proceso de compostaje



Fuente: Adaptado de Moreno y Moral (2008)

pH: la variable pH muestra una notable influencia en el proceso de compostaje pues influye notoriamente en los estados sesionales de los microorganismos a lo largo del proceso (figura 6.4). Como se puede apreciar, el pH inicial de la fracción orgánica se encuentra normalmente entre 5 y 7. Inicialmente cae a 5 o menos de 5, momento en el que la masa orgánica está en temperatura ambiente y se produce una liberación de ácidos orgánicos; posteriormente observamos una alcalinización de la masa orgánica, producto de la migración de dichos ácidos orgánicos y la producción de amoníaco a partir de las proteínas; al finalizar el proceso, el pH tiende a la neutralidad debido a la generación de compuestos húmicos que poseen un efecto tampón.

Humedad: como el proceso de compostaje es en esencia el aprovechamiento de sucesiones microbianas en torno a unos residuos, esta masa microbiana requiere para su desarrollo y sus procesos fisiológicos un contenido adecuado de agua. El porcentaje óptimo de humedad para el proceso de compostaje depende del tipo de residuos que se

mezclan en el proceso, pero en términos generales el rango óptimo se encuentra entre el 50 y 60 %. Es de anotar que el conocimiento de los contenidos de humedad y de las características físicas de los residuos para mezclar es fundamental en la gestión del proceso de compostaje; por ello, se debe tener en cuenta el carácter higroscópico de algunos materiales para ser mezclados por otros que tengan alto contenido de humedad, es decir, materiales fibrosos con materiales suculentos. La gestión técnica del compostaje exige realizar unos cálculos en cuenta a dicha humedad inherente de los residuos para de esta forma calcular cuánta agua externa debe adicionarse aproximadamente.

Aireación: debido a que el compostaje es un proceso eminentemente aeróbico, la aireación debe ser adecuada para que los microorganismos que intervienen en el proceso tengan una dinámica eficiente en la gestión de los residuos y estos últimos presenten una oxidación adecuada para su descomposición; una aireación insuficiente puede generar aparición de poblaciones de microorganismos anaeróbicas que generan algunos compuestos volátiles asociados a olores desagradables.

El proceso de aireación del compostaje es uno de los aspectos que más pesa en los costos de producción; es por ello que su adecuada gestión se constituye en un aspecto clave para la factibilidad económica de una propuesta comercial. La aireación está asociada directamente con el tiempo del proceso de compostaje; los procesos altamente industrializados de compostaje incluyen maquinaria para realizar volteo frecuentemente de la masa orgánica (maquina Backhus, volteadoras de trinchera en nave cerrada e insufladoras de oxígeno en sistemas de compostaje cerrado), mientras que los procesos de compostaje de pequeña escala de agricultores generalmente son diseñados *in situ* y sus sistemas de aireación son muy sencillos (mediante volteos manuales en pilas abiertas y mediante elementos mecánicos como varas, guadas transversales en compostera estática) para evitar costos de mano de obra y su maduración se realiza en tiempos más largos.

6.6 PARÁMETROS DE LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

Tamaño de la partícula: es un parámetro importante en el proceso de compostaje puesto que incide en aspectos como la densidad aparente, la superficie de contacto y, por ende, en un mejor ataque microbial del residuo, que redundaría en una más rápida estabilización del proceso. Según varios autores, las mejores dimensiones del residuo oscilan entre 1 y 5 cm de diámetro. Algunos residuos llegan al proceso con una

dimensión adecuada, como es el caso de la cereza de café, la gallinaza, la caprinaza, etc., pero en algunos como los residuos de vegetales es necesario realizar el picado o desbrozado de los mismos.

Nutrientes: como se ha venido expresando, el compostaje es un producto de la acción de poblaciones de microorganismos que necesitan una fuente de carbono que les proporcione energía y materiales para la constitución de nuevas células, además de una fuente de nitrógeno necesaria para el metabolismo de las proteínas celulares. El nitrógeno es el elemento más importante del proceso y si existe buena disponibilidad de este, la mayoría de los demás nutrientes estarán también disponibles en cantidades adecuadas. El carbono se requiere en la síntesis celular para la conformación del protoplasma, grasas y carbohidratos y durante el metabolismo del compostaje sufre una oxidación para producir energía y dióxido de carbono. Como se observó anteriormente, la gestión para un compostaje adecuado requiere que el proceso inicie con una relación carbono-nitrógeno que oscile entre 25 y 30, como se explicará en el siguiente parámetro. Otro elemento importante es el fósforo, que desempeña una función importante al constituir compuestos celulares ricos en energía (ATP), requeridos en la dinámica microbiana.

Relación C/N y C/P: La relación carbono-nitrógeno es el principal parámetro para la gestión del compostaje (Tchobanoglous et al., 1998). Dicha relación de los contenidos elementales de los residuos orgánicos influye en su velocidad de descomposición pues los microorganismos requieren generalmente 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno; por tal razón, se considera que el óptimo de relación C/N de un residuo o una mezcla de residuos oscila en el rango de 25-30:1. El exceso de nitrógeno genera pérdidas de este elemento en forma de amoníaco y genera olores desagradables; por el contrario, cuando no hay suficiente nitrógeno la descomposición de los residuos en el proceso es más lenta (tabla 6.2).

En la gestión del compostaje es fundamental conocer la composición química de los residuos de la mezcla con el fin de realizar los cálculos aproximados que nos lleven a establecer las proporciones óptimas de dichos residuos, de tal forma que el comienzo del compostaje tenga una relación carbono-nitrógeno que oscile entre 25 y 30.

Según Sanclemente et al., (2011), la alta relación carbono/nitrógeno es un aspecto que influye notoriamente en la dinámica de descomposición del residuo en estudio ya que su bajo contenido de nitrógeno incide negativamente en el metabolismo microbiano, lo que desencadena el estancamiento de la descomposición. Por ser un residuo en el que priman la celulosa y la hemicelulosa, con una alta relación carbono/nitrógeno, que está por el orden de 13:1, se puede apreciar que después de la cuarta semana del proceso

la tasa de descomposición presenta una tendencia similar para todos los tratamientos. Esto se debe además de otros aspectos, al bajo contenido de nitrógeno en dicha relación, lo cual repercute en el metabolismo microbiano y afecta la descomposición.

A manera de ejemplo, si se cuenta con dos residuos cuyo análisis de laboratorio generó los siguientes resultados:

- a. Boñiga: C/N= 18; nitrógeno= 0,7 % y humedad= 65 %
- b. Pasto: C/N=45; nitrógeno= 0,2 % y humedad= 45 %

Después de realizar los cálculos pertinentes se encuentra que por cada tonelada de boñiga con las características mencionadas se requieren 1,78 toneladas de pasto para obtener una relación C/N de 30; adicionalmente, al evaluar el contenido inicial de humedad se encuentra que está por el orden de 52 %, encontrándose en el rango apropiado, pero podríamos hacer los cálculos para llegar a 60 % para lo cual se necesita según el peso total, que son 2781 toneladas de mezcla, 549 litros adicionales de agua.

En cuanto a la relación C/P, investigaciones han encontrado que compostajes de paja de trigo con adición de roca fosfática aumentan la descomposición en la medida que se aumenta la cantidad fósforo añadida. El óptimo de relación C/P para el compostaje oscila entre 75 y 150 y para la relación N/P está en el rango de 5 a 20 (Moreno y Moral 2008).

TABLA 6.2 Relación carbono-nitrógeno y % de nitrógeno en base seca de algunos residuos

MATERIAL	% NITRÓGENO (MS)	RELACIÓN C/N
Bovinaza	1.7	18
Gallinaza	3 - 6	15
Porquinaza	3.8	20
Equinaza	2.3	25
Cortes de prado	3.6	12-15
Tamo de trigo	0.3- 0.5	128-150
Viruta de madera	0.1	200-500
Suelo nocturno	5.5-6.5	6-10
Orines	15-18	0.8
Ovinaza	3.75	22
Residuos de fruta	1.52	34.8
Residuos de aserraderos	0.13	170.0
Paja de avena	1.05	48.0

MATERIAL	% NITRÓGENO (MS)	RELACIÓN C/N
Madera (pino)	0.07	723
Papel de periódico	0.05	983
Correo basura	0.17	223
Papel mezclado	0.25	173
Jacinto de agua	1.96	20.9
Hierba bermuda	1.96	24
Residuos mezclados de mataderos	7.0-10.0	2.0
Fangos digeridos activados	1.88	15.7
Fangos crudos activados	5.6	6.3
Hojas (caídas recientemente)	0.5-1.0	40.08 - 80.0
Pulpa de café	1.0-2.3	8
Harina de pescado	4 - 10	4-5
Basura urbana, alto contenido en material vegetal	2-3	10-16
Basura urbana, alto contenido en papel	0.6-1.3	30-80
Harina cascos y cuernos	12	ND

Fuente: Adaptado de Dalzell et al. (1991)

6.7 MICROBIOLOGÍA DEL COMPOSTAJE

El proceso del compostaje constituye una dinámica microbial en donde dichos organismos utilizan unos residuos orgánicos como fuente de carbono y energía en condiciones aeróbicas. En este proceso se presentan sucesiones poblacionales de diferentes microorganismos regidos por factores como la temperatura, el pH, la humedad y las diferentes macro y micro moléculas orgánicas (tabla 6.3).

Inicialmente, en la fase mesofílica existe una gestión microbiana de los residuos caracterizada por poblaciones de bacterias Gram+, Gram-, lactobacillus y actinomicetos y hongos como penicillium y aspergillus, donde la temperatura oscila entre la temperatura ambiental hasta más o menos 40 °C; en ella existe una alta disponibilidad de nutrientes y el pH de la masa sufre una leve acidificación (que llega cerca de un pH 5) debido a la alta producción de ácidos orgánicos.

TABLA 6.3. Sucesiones microbiales del compostaje

1. FASE MESÓFILA	2. FASE TERMÓFILA	3. FASE DE ENFRIAMIENTO	4. FASE DE MADURACIÓN
BACTERIAS	BACTERIAS	BACTERIAS	BACTERIAS
Gram-	Bacillus	Gram+	Gram-
Proteobacterias (Pseudomonas)	Thermus	Actinomicetos	Actinomicetos
Gram +	Hydrogenobacter	Hongos	Hongos:
Bacillus	Actinomicetos	Ascomycota y Basidiomycota	Ascomycota, Zygomycota, Oomycota
Lactobacillus	Streptomyces	Protozoos	Algas
Actinomicetos		Nematodos	Nematodos
HONGOS		Estramenopilos	
Ascomycota: Penicillium/Aspergillus			
Zygomycota Mucor.			

←
→
←
→

1-2 meses
2-4 meses

Fuente: Adaptado de Moreno y Moral (2008)

A continuación se presenta la etapa termofílica, donde aparecen otros actores microbiales como Bacillus, Thermus y Streptomyces, en la cual la temperatura arranca de más o menos de 42 a 45 °C, puede llegar cerca de 65 °C (aspecto que debe ser monitoreado en el proceso de compostaje) y luego baja al orden de 45 a 50 °C, producto de los volteos que se realizan en el proceso compostaje y por la disminución de los compuestos fácilmente biodegradables en la masa de residuos; en cuanto al pH en esta segunda etapa, tiene un interesante ascenso debido a la liberación de amoníaco producto de la mineralización del nitrógeno y rutas metabólicas de los microorganismos en torno a las proteínas y los ácidos orgánicos, de tal forma que el pH se puede ubicar cerca de 8,5 al finalizar esta fase.

Posteriormente se presenta la fase de enfriamiento, donde predominan bacterias Gram+, actinomicetos, protozoos, nematodos y hongos como penicillium y aspergi-

llus; la temperatura desciende ostensiblemente y al terminar esta fase se encuentra un poco por encima de la temperatura inicial del proceso de compostaje y el pH se estabiliza a valores cercanos a la neutralidad. Finalmente, se presenta la fase de maduración, donde priman los hongos; también se presentan poblaciones de bacterias Gram-, Actinomicetos, algas y nematodos. Esta fase se caracteriza por que el pH se estabiliza cerca de la neutralidad, la temperatura de la masa orgánica regresa a su estado inicial del proceso y la relación C/N se encuentra entre 10 y 20.

6.8 BIOQUÍMICA DEL COMPOSTAJE

Al inicio del proceso de compostaje, en la etapa mesofílica, las macromoléculas fácilmente degradables sirven de sustrato y de energía a las poblaciones microbiales (tabla 3), por tanto hay liberación de agua y dióxido de carbono, lo que reduce el contenido de carbono en la masa compostable y tiende a aumentar el porcentaje de la fracción mineral. En esta etapa prima el $N-NH_4$ sobre el $N-NO_3$. En la etapa termofílica comienza la degradación de macromoléculas de difícil descomposición (hemicelulosa, celulosa y lignina).

En esta etapa se genera la máxima liberación de dióxido de carbono y agua, lo que disminuye la concentración de carbono y eleva el porcentaje de minerales. Esta etapa es fundamental en la disociación de moléculas contaminantes y en la ruptura de enlaces de todo tipo de moléculas. En la fase de maduración se invierte la presencia de nitrógeno nítrico frente a la amoniacal y continua la reducción del carbono en la masa. La formación de ácidos húmicos empieza a ser importante y el pH tiende a la neutralidad. En etapa de maduración sigue la tendencia al aumento de la fracción mineral y de los nitratos y la disminución del porcentaje de carbono. Al terminar el proceso, es importante (dependiendo los residuos utilizados en el compostaje) calcular el coeficiente isocompuesto, que es la fracción del residuo o la mezcla estandarizada de ellos que se convierte en compost.

6.9 ACELERADORES DEL COMPOSTAJE

En la actualidad se vienen desarrollando tecnologías que aceleran los procesos de transformación de la materia orgánica y que tienen efectos positivos cuando se utilizan en el compostaje.

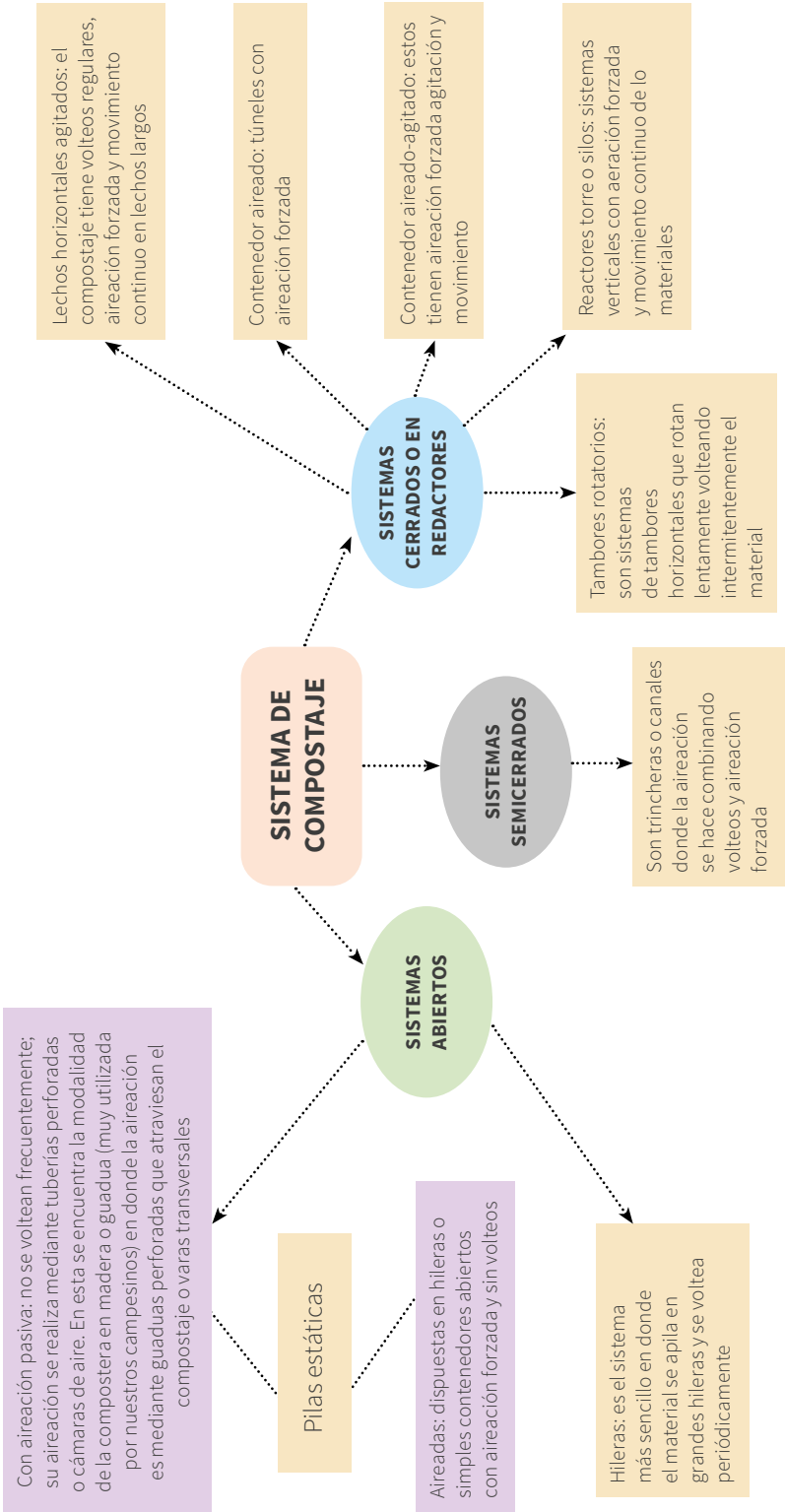
Los aceleradores finitos: se denominan así a las sustancias que al ser adicionadas a los suelos o a los residuos orgánicos generan una aceleración en la velocidad de la mineralización de la materia orgánica del suelo o en la transformación de los residuos. Se denominan aceleradores finitos porque una vez agotados en el proceso, cesa la aceleración. En el proceso de compostaje se pueden considerar aceleradores finitos de nitrógeno a las leguminosas, el matarratón o materiales ricos en azúcar como la miel de purga (Gómez, 2004).

Los aceleradores Infinitos: Se denominan así a los inoculantes microbiales especiales que se adicionan al suelo o a los residuos orgánicos con el fin de acelerar la velocidad del proceso de mineralización de la materia orgánica del suelo o la transformación de los residuos. Se denominan aceleradores infinitos porque continúan su labor en el largo plazo pues continúan reproduciéndose si hay sustrato para hacerlo (Gómez, 2004). En el mercado existen variados productos basados en microorganismos especializados en descomponer residuos; es el caso de microorganismos eficientes, otros a base de *Trichoderma lignorum* y otros especializados en descomponer materiales lignocelulíticos.

6.10 SISTEMAS DE COMPOSTAJE

Tanto en Colombia como en el mundo existen diferentes sistemas de habilitación de los residuos sólidos mediante el compostaje, que dependen de variables como la tecnología, los recursos económicos, los volúmenes y los tipos de residuos (figura 6.5).

FIGURA 6.5. *Sistemas de compostaje*



Fuente: Los autores

A nivel nacional, el manejo del compostaje se viene desarrollando para habilitar diferentes residuos, principalmente en los sectores de los palmicultores, avicultores, caficultores, cañicultores, ganaderos y floricultores, entre otros. Existe además un sector de productores de abonos orgánicos a base de compost que mediante el enriquecimiento mineral e inoculación de microorganismos le dan valor agregado al compost y lo comercializan en diferentes contextos del país.

6.11 CARACTERIZACIÓN DEL COMPOST

Terminado el compostaje y habiendo tenido la habilitación completa de los residuos, no podemos decir que ese recurso se constituye en un abono orgánico en el sentido estricto de la palabra porque existe un marco normativo nacional en donde se encuentra la Resolución No 00150 ICA y las normas técnicas NTC 5167 y 1927, que establecen los diferentes criterios y especificaciones técnicas que se deben cumplir para diferenciar si ese producto es un abono orgánico, orgánico-mineral, una enmienda o un acondicionador de suelos. Para tal efecto, a continuación aclaramos el significado de cada uno de ellos.

Enmienda orgánica: material orgánico que se adiciona al suelo para mejorarle sus condiciones químicas adversas como pH, salinidad, acidez, aluminio intercambiable etc.

Abono: producto, insumo o recurso que al ser aplicado al suelo o a las plantas suministra nutrientes, de forma que se obtiene una respuesta sensible por parte del cultivo.

Sustrato: materiales sólidos, orgánicos o inorgánicos colocados en contenedores en los cuales las plántulas encuentran el medio óptimo para el anclaje y desarrollo de las raíces.

Acondicionador de suelos: recurso, producto o insumo que se aplica al suelo con el fin de mejorar sus condiciones físicas.

Para poder gestionar un compost como abono orgánico ante el ICA y de esta forma comercializarlo con registro es importante evaluar su calidad. Un abono orgánico o un orgánico-mineral debe tener un contenido mínimo de la sumatoria de nitrógeno, fósforo y potasio expresado en porcentaje en base seca, un contenido de humedad, una estabilidad y granulometría adecuados (anexos 1 y 2). De otra parte, existen en el mercado diferentes insumos tanto orgánicos como minerales utilizables para mejo-

rar la calidad del compost; además, el hecho de no cumplir esas características no lo excluye de que se pueda comercializar como enmienda o acondicionador (anexo 3).

6.12 PROCEDIMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN COMPOSTAJE

Las técnicas de producción de compostaje de los residuos orgánicos tratan de ajustarse a las condiciones mencionadas anteriormente. Dependiendo del nivel tecnológico del proceso, lo más importante es que se elija un procedimiento sencillo que se pueda llevar a cabo con la mano de obra, la capacidad y los medios económicos disponibles. Los aspectos que se tienen en cuenta para decidir el proceso a emplear son:

- Tipo de desechos, facilidad de descomposición y presencia de patógenos en ellos.
- Cantidad de compost que hay que elaborar
- Costo permisible en términos de mano de obra, equipos y espacio.
- Uso que se le va a dar al compost.

Basado en estos cuatro aspectos, se diseña la estructura de la planta o zona donde se realizará el proceso teniendo en cuenta la dinámica de entrada de residuos y de salida del recurso compost, es decir, el área de recepción de insumos, las líneas de distribución de los mismos en el interior de las composteras y las líneas de salida del producto final (compost). Es fundamental establecer la cubierta de la estructura pues el compostaje es un proceso aeróbico, por lo tanto, la variable humedad debe ser manejada adecuadamente.

Luego, con base en los parámetros de seguimiento y los parámetros relativos a la naturaleza de los sustratos con que se cuenta, se define el plan de producción, que tiene en cuenta los siguientes aspectos:

1. Definir las proporciones de los residuos en la mezcla según la relación carbono / nitrógeno.
2. Establecer la metodología para obtener el tamaño de partícula óptimo para el proceso.
3. Establecer la estrategia de mezcla de residuos, humedecimiento de la misma y dinámica de volteos de la masa de residuos.

4. Establecer la estrategia para evaluación de parámetros de seguimiento de la evolución del compostaje (grado de madurez del compost) y variables de calidad del producto final.
5. Fijar la metodología de recolección y empaque.

6.13 CONCLUSIONES

El proceso de compostaje exige una gestión técnica que implica el conocimiento de los residuos que se van a utilizar, las dinámicas microbiales y los gradientes de temperatura para obtener al final un insumo adecuado para su utilización en la agricultura. El compost es un insumo que puede presentar diferentes expresiones que lo tipifiquen como enmienda, abono orgánico, abono orgánico enriquecido con minerales o abono orgánico enriquecido con minerales e inoculado con microorganismos; por tanto, no se puede generalizar su aplicación sin tener en cuenta su naturaleza.



El compostaje se constituye en una estrategia de la sociedad para habilitar de forma técnica residuos y macromoléculas de la agroindustria que, sin su debido tratamiento, pueden ser contaminantes.

6.14 REFERENCIAS

Bueno, M. (1999). *El Huerto Familiar Ecológico*. Editorial RBA Libros.

ICONTEC – ICA. (2003) Sobre Fertilizantes en Colombia. Reglamentos y Normas Técnicas Colombianas.

Dalzell, H., Biddlestone, A., Gra, K. y Thurairajan, K. (1991). *Manejo del Suelo: Producción y Uso de Compostaje en Ambientes Tropicales y Subtropicales*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. Boletín de suelos N° 56 de la FAO.

Eweis, J., Ergas, S., Chang, D. y Schroeder, E. (1999). *Principios de Biorrecuperación*. Editorial Mac Graw Hill.

Gómez, J. (2000). *Abonos Orgánicos*. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, J., Pineda, A., y Prager, M. (2002). *Acolchados Orgánicos*. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, J. (2004). *Aceleradores de la materia orgánica*. Asiava, (67), 10-11.

Moreno, J. y Moral, R. (2008). *Compostaje*. Editorial Mundiprensa.

Sancllemente, O., García, M. y Valencia, F. (2011). Efecto del uso de melaza y microorganismos eficientes sobre la tasa de descomposición de la hoja de caña (*Saccharum officinarum*). *Revista Investigación Agraria y Ambiental*, 2(2), 13-19.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Editorial Mac Graw Hill.

Valverde, A., Encinales, J., Vargas, G. y García, M. (2020). *Alternativas sostenibles para sistemas productivos de limón*. Ediciones Unibagué.