



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**



**CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE COMPOST  
OBTENIDO A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS  
ALIMENTICIOS Y DE PODA DE LA  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
DE LA UNIVERSIDAD ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”,  
PRESIDENTE PRUDENTE, SÃO PAULO, BRASIL**

**Autora: Florencia Andrea Rivero**

**Director: Dr. Peter Thomas**

**Tesis de grado de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables**

**Mendoza 2014**

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Justificación	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo general	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
2. EL PROCESO DE COMPOSTAJE	10
2.1 Antecedentes	10
2.2 Fundamentos	10
2.3 Fases del proceso de compostaje	11
2.4 Condiciones iniciales, seguimiento y mecanismos de control	12
2.4.1 Tamaño y naturaleza de la partícula	12
2.4.2 Composición química del sustrato	13
2.4.3 Humedad	13
2.4.4 Relación C/N	14
2.4.5 Materia Orgánica	16
2.4.6 Temperatura	16
2.4.7 pH	17
2.4.8 Oxígeno	17
2.5 Microbiología del proceso de compostaje	17
2.5.1 Diversidad microbiana	18
2.5.2 Sucesión microbiana	18
2.5.2.1 Fase mesófila inicial	19
2.5.2.2 Fase termófila	19
2.5.2.3 Etapas de enfriamiento y maduración	19
2.5.3 Microorganismos beneficiosos	20
2.5.4 Microorganismos perjudiciales	21
2.5.4.1 Generadores de olores no deseables	21
2.5.4.2 Patógenos y control	21
2.6 Bioquímica del proceso de compostaje	22
2.6.1 Descomposición, mineralización y humificación	22
2.6.2 Requerimientos nutricionales	22
2.7 Consideraciones generales de los efectos físico-químicos de la aplicación de compost en suelos	23
3. ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DESARROLLO Y CONTROL DEL COMPOSTAJE	25
3.1 Clasificación de las tecnologías	25
3.1.1 Proceso de aireación	25
3.1.2 Sistemas abiertos	26
3.1.3 Sistemas cerrados	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL COMPOST	28
4.1 Caracterización de la zona de estudio	28
4.2 Muestreo de los Residuos Orgánicos	28
4.3 Compostaje convencional (manual)	30

4.4 Compostaje mecánico (reactor)	32
4.5 Métodos Analíticos	34
4.5.1 pH	35
4.5.2 Humedad	35
4.5.3 Materia orgánica total	36
4.5.4 Residuo mineral total	36
4.5.5 Carbono orgánico	36
4.5.6 Relación C/N	36
4.5.7 Macronutrientes	37
4.5.8 Granulometría	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1 Análisis visual de los compuestos	40
5.2 Análisis químico de los compuestos	41
5.2.1 Compostaje convencional (manual)	41
5.2.2 Compostaje mecánico (reactor)	42
5.3 Análisis granulométrico de los compuestos	43
5.4 Análisis y comparación de los resultados según las metodologías	44
6. CONCLUSIONES	47
7. GLOSARIO	48
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema general del proceso de compostaje.....	11
Figura 2: Sucesión microbiana y ambiental durante el compostaje. ....	12
Figura 3: Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje.....	15
Figura 4: Etapas del proceso de compostaje. ....	20

## ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Triturador eléctrico utilizado para la desintegración de los residuos. ....	29
Foto 2: Residuos de las cantinas triturados. ....	29
Foto 3: Comienzo del montado de hileras convencionales intercalando residuos.....	30
Foto 4: Montado de las hileras convencionales. ....	31
Foto 5: Hileras del compostaje convencional montadas.....	31
Foto 6: Hileras del compostaje convencional luego de 90 días .....	32
Foto 7: Disposición de los reactores del compostaje mecánico.....	32
Foto 8: Compresor de aire utilizado en el compostaje mecánico.....	33
Foto 9: Disposición de los residuos en capa en reactor (compostaje mecánico). ....	33
Foto 10: Secado de los compuestos producidos en hileras y reactores.....	34
Foto 11: Compost siendo tamizado para luego ser utilizado en siembra. ....	34
Foto 12: Compost finalizado.....	35
Foto 13: Hileras del compostaje convencional al comenzar el proceso de compostaje.....	40
Foto 14: Hileras convencionales pasados 90 días del proceso de compostaje.....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relación C/N de algunos materiales relacionados con la producción de compost. ....	15
Tabla 2: Caracterización química de los compuestos producidos en hileras convencionales .....	41
Tabla 3: Caracterización química de los compuestos producidos en reactor.....	42
Tabla 4: Distribución granulométrica de los compuestos producidos en hileras convencionales (manual) y en reactor (mecánico) .....	43

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Caracterización química de los compuestos producidos en hileras (manual) ..... 44

Gráfico 2: Caracterización química de los compuestos producidos en reactor (mecánico) ..... 45

## 1. INTRODUCCIÓN

El término “residuo” se aplica a todo material generado por las actividades de producción y consumo, el cual no alcanza ningún valor económico en las condiciones particulares de tiempo y de lugar en que se ha producido, y que es preciso recoger y tratar por razones de salud y de contaminación ambiental, para evitar ocupaciones innecesarias de espacio (ABAD y PUCHADES, 2002). Los residuos se pueden clasificar, según su naturaleza química, en orgánicos e inorgánicos, destacando los orgánicos por su elevado volumen de producción y su fuerte impacto ambiental.

Entre los diferentes métodos de tratamiento de los residuos orgánicos se destaca como una alternativa el compostaje para lograr un producto de aplicación en el mejoramiento y la fertilización de suelos.

Según CASTELLS (2005), el proceso de compostaje es: “descomposición biológica y estabilización de un sustrato orgánico bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas en el rango termófilo como resultado del proceso biológico aeróbico exotérmico, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y que pueda ser aplicado al suelo de forma beneficiosa”. Este producto final estable recibe el nombre de compost: permite el mantenimiento de la fertilidad de los suelos así como el mejoramiento de sus características físicas y la producción de cultivos de calidad.

El compostaje es un proceso dinámico, biológico, aeróbico y en el mejor de los casos se desarrolla bajo condiciones termófilas, y para llevarse a cabo necesita: materia orgánica, población microbiana inicial y las condiciones óptimas para que éste se desarrolle con multiplicidad de funciones y actividades sinérgicas. Para ello deben mantenerse una serie de equilibrios entre los siguientes elementos: oxígeno, humedad, temperatura, nutrientes, pH, relación C/N. Los intervalos óptimos de estos elementos están influenciados por las condiciones ambientales, el tipo de residuo y el sistema de compostaje elegido.

Los residuos orgánicos, prácticamente en todos los casos, están colonizados por diversos microorganismos endógenos, que al disponer de las condiciones adecuadas se reproducen y favorecen la aparición de una sucesiva diversidad microbiana (mesófila y termófila). Los microorganismos aerobios transforman materia orgánica en biomasa celular y en compuestos oxidados, siguiendo reacciones exotérmicas que producen un incremento de la temperatura del medio en que se desarrollan.

Este aumento de temperatura, da inicio a una fase termogénica que debe optimizarse para maximizar la higienización, que ha de alcanzar tres objetivos: prevenir el crecimiento y diseminación de patógenos durante el compostaje, destruir los inicialmente presentes y producir un producto final difícilmente recolonizable por patógenos. A su vez, debe evitarse la autoeliminación microbiana por elevación excesiva de la temperatura. Por esta razón, la aireación tiene otra función además de aportar oxígeno: disipar energía calorífica a través del calor latente de vaporización del agua.

El proceso de compostaje es muy versátil y puede aplicarse a una gran variedad de residuos con inputs tecnológicos muy bajos o muy altos, dependiendo de las cantidades y tipos de residuos a tratar y de la disponibilidad de espacio, tiempo y presupuesto.

El compost, al ser aplicado en el suelo mejora la infiltración y retención del agua, disminuye la fluctuación de temperatura, reduce la erosión, aumenta la actividad biológica, mejora la sanidad de los cultivos al favorecer un control de plagas natural y aporta nutrientes para el sustento de las plantas.

Actualmente, el campus de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCT/UNESP) posee una estructura de 206 docentes, 230 empleados técnico-administrativos, 2.929 alumnos regulares de grado y 745 de pos-grado, por lo que se genera una cantidad de 25 kilogramos de residuos orgánicos diarios provenientes de las cantinas (restos de comida, verduras, frutas), así como también 8.000 kilogramos por año de residuos de poda y desmalezado (predominancia de pastos y hierbas). Los residuos orgánicos de las cantinas son recogidos y destinados al basurero municipal, mientras que los residuos de poda y desmalezado, son depositados formando montículos en pozos presentes en una zona apartada del campus, ocasionando malos olores por su descomposición, así como también atrayendo vectores causantes de posibles enfermedades.

En el presente trabajo, la autora probará y caracterizará en laboratorio dos tipos de compuestos orgánicos provenientes del compostaje de los residuos orgánicos alimenticios de las cantinas o comedores (sin carnes) y de los residuos de poda de la FCT/UNESP. En ambos sistemas de tratamiento son producidos compuestos orgánicos con diferentes proporciones de residuos de poda y alimenticios de las cantinas.

Una vez finalizado el proceso de compostaje, los compuestos orgánicos producidos en los dos sistemas de tratamiento y las diferentes proporciones serán analizados físico-químicamente.

## **1.1 Justificación**

En el año 2011 la autora tuvo la posibilidad de realizar un intercambio universitario a través del programa de movilidad estudiantil de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo) en la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Estadual Paulista (FCT-UNESP), ubicada en la ciudad de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, lo que le permitió experimentar un ejemplo exitoso con la cantidad de investigaciones de alumnos de grado y el fomento que existe a través de diferentes instituciones de investigación de esta casa de estudios.

En este contexto, obtuvo la oportunidad de participar en diferentes proyectos y eligió ser parte de uno que tiene como temática un gran problema de la actualidad: los residuos orgánicos.

La producción de residuos orgánicos se encuentra en constante crecimiento debido al aumento de la población y a los padrones actuales de consumo. Esta realidad acarrea la problemática de qué alternativa adoptar para eficientizar el gerenciamiento de los mismos.

Considerar los residuos orgánicos como recursos e ingresarlos nuevamente al sistema, permite generar un ahorro energético y de materias primas, además de reducir la cantidad de residuos que se disponen en basurales, ya que los residuos orgánicos son biodegradables y pueden convertirse, mediante procesos biológicos, en compuestos asimilables para las plantas. Una de las tecnologías que permite esto es el proceso del compostaje: la obtención de compost es una de las consecuencias del reciclado de residuos orgánicos, cuya utilización solucionaría una doble problemática: la falta de materia orgánica de los suelos y la cantidad de residuos acumulados.

Por todos estos motivos surgió la necesidad de ahondar en el conocimiento de esta temática, realizando un estudio comparativo de características físico-químicas de diferentes compost obtenidos a partir de residuos orgánicos alimenticios y de poda de la FCT-UNESP, para de esta manera poder analizar y puntualizar ventajas y desventajas de este método y proveer una metodología de muestreo para poder ser aplicada en futuros análisis o como técnica de tratamiento de los residuos orgánicos también en instituciones fuera del contexto de esta universidad.

## 1.2 Objetivos

**1.2.1 Objetivo general:** Caracterización físico-química de dos tipos de compuestos orgánicos provenientes del compostaje de residuos de las cantinas y de la poda de la Facultad de Ciencias e Tecnología, Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCT-UNESP), Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, con el fin de dejarlos disponibles para ser utilizarlos como enmienda en suelos agrícolas arenosos de clima tropical lluvioso.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

- Realizar y evaluar dos metodologías de compostaje (manual y mecánica) con diferentes proporciones de residuos de poda y alimenticios de las cantinas.
- Elaborar dos tipos de compuestos orgánicos como sustratos con diferentes proporciones de residuos de poda y alimenticios de las cantinas con el contexto climático del lugar.
- Analizar físico-químicamente los compuestos orgánicos producidos en los dos sistemas de tratamiento con sus diferentes proporciones de residuos de poda y alimenticios de las cantinas.
- Detallar ventajas del compostaje y proveer una técnica de tratamiento de los residuos orgánicos.

## **2. EL PROCESO DE COMPOSTAJE**

### **2.1 Antecedentes**

La evolución del compostaje es cíclica, sus objetivos han ido variando al cambiar el desarrollo y los intereses de la sociedad (CROWE, M. *et al.*, 2002).

Aunque históricamente es difícil atribuir a una persona o a una sociedad o época concreta los inicios del compostaje, sí se puede afirmar que surgieron con la agricultura, cuando la humanidad pasó de ser nómada a sedentaria. A partir de este momento se empieza a “gestionar los residuos”, enterrándolos, quemándolos, usándolos para alimentación animal o bien transformándolos a través de un proceso de compostaje. Este proceso se realizaba sin control, requería largos períodos de tiempo y no siempre se aseguraba la conservación de los nutrientes ni la higienización (GOTAAS, 1956).

A finales del siglo XIX, debido a los descubrimientos de Pasteur acerca de la “generación espontánea”, se produce un cambio radical en la historia de los residuos, implementándose sistemas de recogida y de vertido para evitar problemas sanitarios. Luego, durante la segunda guerra mundial, el compost y los abonos orgánicos tuvieron un importante resurgimiento sobre todo para cultivos de viña y hortícolas, pero la mala calidad de algunos productos provocó que cuando hubo una ligera recuperación económica fuesen substituidos por los fertilizantes minerales que daban una respuesta rápida a las necesidades de los cultivos (MORENO CASCO, 2008).

Después de la segunda guerra mundial la agricultura incrementó su mecanización y el uso de fertilizantes sintéticos fue reemplazando la práctica de aplicar estiércoles y compost a los suelos para mantener su fertilidad. Más adelante, con la crisis del petróleo en 1973 vuelve a aparecer el interés por el reciclaje y por la materia orgánica, lo que le da un impulso importante al compostaje (MORENO CASCO, 2008).

Los principios básicos del compostaje han sido apreciados y usados a lo largo de los siglos aunque con distinta intensidad según la situación económica y social de la época. Últimamente ha vuelto a recuperarse debido al crecimiento desmesurado de la generación de residuos, problemas de suelos pobres de materia orgánica y falta de espacio para ubicar vertederos, entre otros (MISRA, R. *et al.*, 2003).

### **2.2 Fundamentos**

El compostaje puede ser definido como una técnica de tratamiento y estabilización de residuos orgánicos, a través de la cual, en un proceso biológico de oxidación aerobia y exotérmica de un sustrato orgánico sólido, se obtiene producción de CO<sub>2</sub>, vapor de agua, sustancias minerales y la formación de materia orgánica estable denominada compost.

Los residuos orgánicos están colonizados por diversos microorganismos endógenos que al disponer de las condiciones adecuadas se reproducen y favorecen la aparición de una sucesiva diversidad microbiana. El incremento de la actividad biológica genera calor que es retenido provocando un incremento de temperatura. La fase termófila es fundamental para la higienización que debe alcanzar tres objetivos: prevenir el crecimiento y diseminación de patógenos durante el compostaje, destruir los inicialmente presentes y producir un producto final difícilmente recolonizable por patógenos.

Las condiciones ambientales (físicas y químicas) en las que se desarrolla la actividad microbiana están constantemente cambiando, como resultado de la acumulación de los subproductos de la misma actividad.

El compostaje tiene por objetivos:

- Facilitar la gestión de los residuos orgánicos procedentes de distintas actividades, reduciendo su peso y volumen, a la vez que lo estabiliza y genera un producto útil.
- Obtener compost que permite el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, la producción de cultivos de calidad y la conservación del entorno, así como el mejoramiento de características físicas y químicas del suelo.

El proceso de compostaje puede representarse de la siguiente manera en forma genérica:

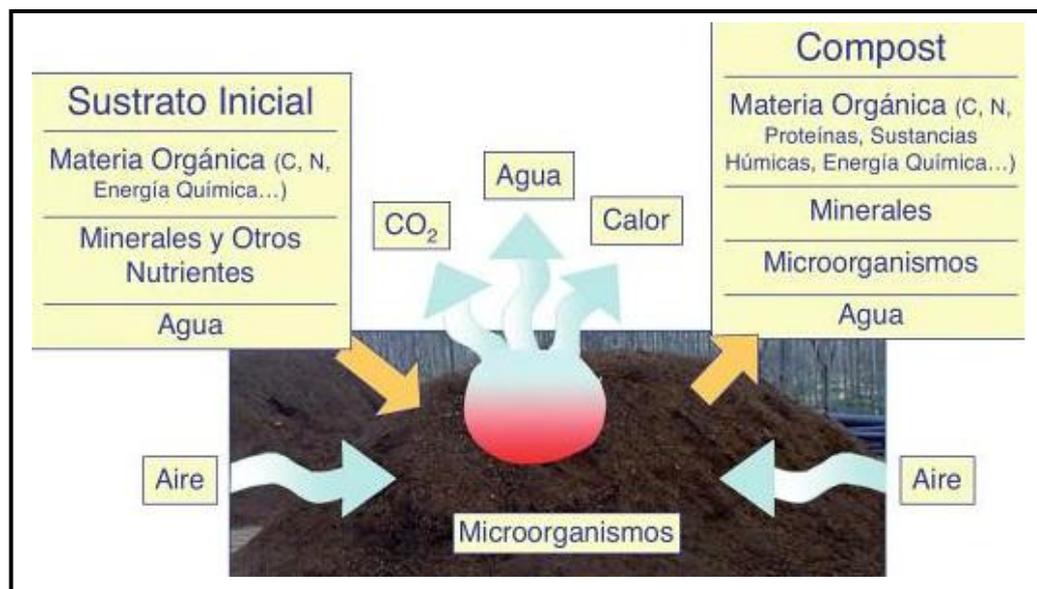


Figura 1: Esquema general del proceso de compostaje. FUENTE: MORENO CASCO, 2008.

### 2.3 Fases del proceso de compostaje

El proceso de compostaje está compuesto por dos fases consecutivas: descomposición y maduración.

En la primera fase (descomposición) diferentes poblaciones de bacterias, actinomicetos y hongos, trabajando de forma simultánea, descomponen los constituyentes de la materia orgánica, hidratos de carbono, proteínas y lípidos, en medio aerobio con reacciones exotérmicas. Esta fase puede subdividirse en tres etapas: una inicial mesófila en la que se pasa de temperatura ambiente a 40°C, durante la cual diversas familias de microorganismos mesófilos inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento en la temperatura y un ligero descenso del pH debido a la formación de ácidos orgánicos. Una segunda etapa termófila donde aparecen microorganismos termófilos y se superan los 40°C. Las sustancias fácilmente degradables, proteínas, azúcares y lípidos son rápidamente consumidas y la mayoría de patógenos eliminados. El pH se recupera y se alcaliniza debido al consumo de los ácidos orgánicos y al aumento de la concentración de amonio como consecuencia de la descomposición de las proteínas. El aumento de la temperatura en esta fase, favorece el crecimiento de microorganismos termófilos, y de esta manera se logra la destrucción de semillas de malezas, huevos y larvas de insectos así como de patógenos. A medida que la concentración relativa de compuestos orgánicos resistentes aumenta, la velocidad de descomposición y el consumo de oxígeno decrecen.

Finalmente, en la tercera etapa de la fase de descomposición (enfriamiento), la temperatura empieza a disminuir, los hongos termófilos desaparecen. El proceso de compostaje continúa gracias a bacterias esporógenas y actinomicetos, la celulosa y hemicelulosa inician su descomposición. En esta última fase, polímeros de la celulosa y lignina quedan parcialmente alterados, y pasan a ser en la fase de maduración, las estructuras básicas para la formación de nuevas macromoléculas (CASTELLS, 2005).

En la etapa de maduración tienen lugar procesos de biopolimerización, para formar moléculas complejas y estables; microorganismos mesófilos y diversa microfauna colonizan el material para obtener un compost completamente estabilizado y parcialmente humificado (CASTELLS, 2005).

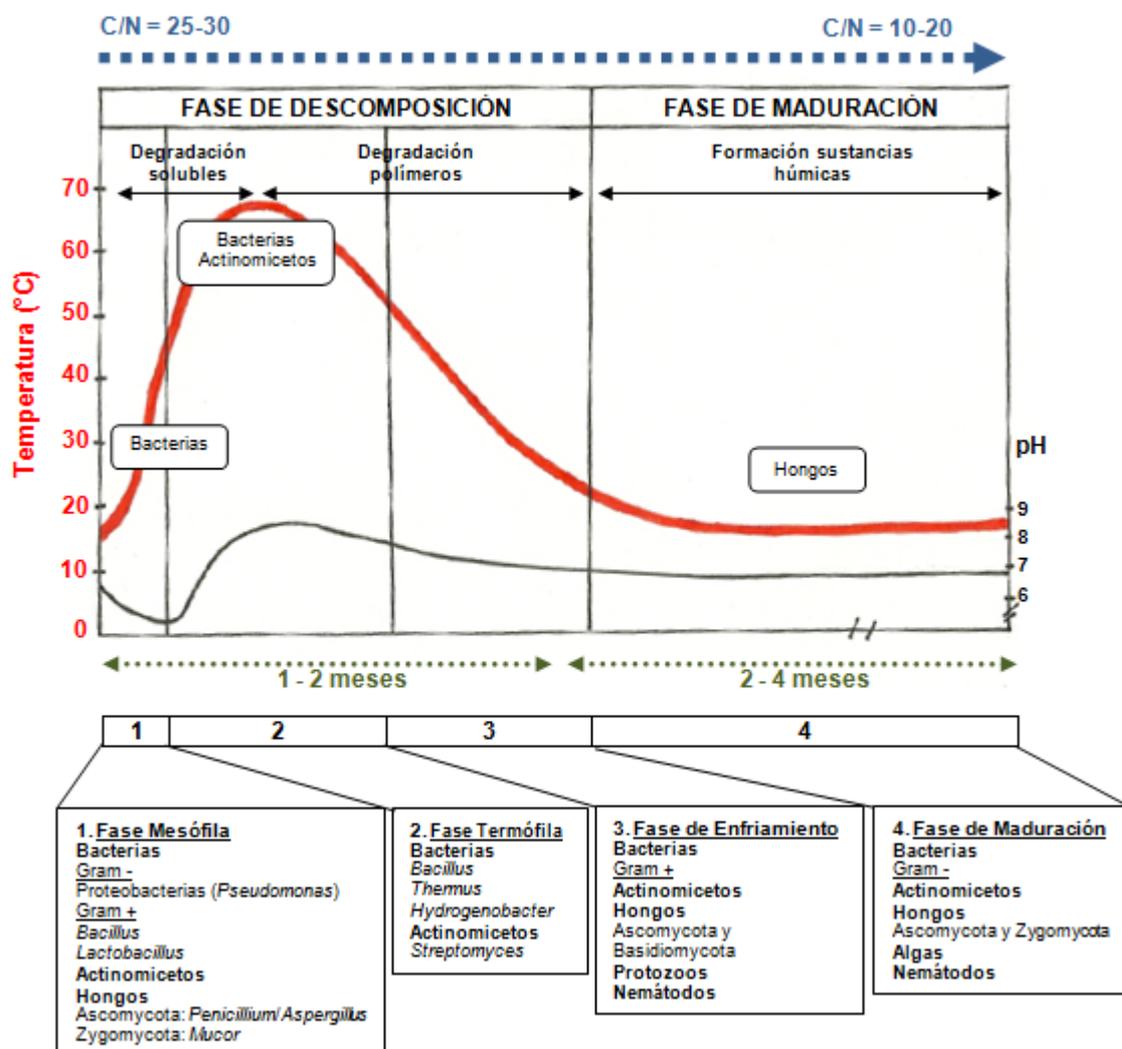


Figura 2: Sucesión microbiana y ambiental durante el compostaje. FUENTE: Adaptado por RIVERO, F. según MORENO CASCO, 2008.

## 2.4 Condiciones iniciales, seguimiento y mecanismos de control

### 2.4.1 Tamaño y naturaleza de la partícula

El tamaño y el grado de destrucción 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 facilitará el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso (MORENO CASCO, 2008).

Algunos materiales deben ser triturados hasta obtener un tamaño de partícula susceptible al ataque microbiano. Esta operación acelera notablemente los procesos de compostaje. A menor tamaño de partícula, mayor es la superficie de contacto con los microorganismos, y consecuentemente, se facilita la degradación de la materia orgánica.

Además un tamaño de partícula pequeño facilita la homogeneización y mezcla de los materiales, y favorece el aislamiento térmico, lo que favorece al mantenimiento de las temperaturas óptimas durante todas las etapas del proceso. No obstante, un tamaño de partícula excesivamente pequeño, puede provocar la compactación del material y por lo tanto generar condiciones de anoxia.

Las dimensiones consideradas como óptimas son distintas según los criterios de los autores, variando entre 1 y 5 cm (HAUG, 1993), o entre 2 y 6 cm (KIEHL, 1985).

#### **2.4.2 Composición química del sustrato**

Los microorganismos sólo pueden aprovechar compuestos simples, por lo que las moléculas más complejas se rompen en otras más sencillas para poder ser asimiladas. La capacidad de los microorganismos para asimilar la materia orgánica depende de su habilidad para producir las enzimas necesarias para la degradación del sustrato. Un tamaño molecular elevado, así como también la presencia de enlaces químicos complejos, dificulta la degradación por parte de algunos microorganismos, y por lo tanto el proceso de descomposición se produce más lentamente. De esta manera, las moléculas orgánicas monoméricas (azúcares y aminoácidos) son más fácilmente degradables que las poliméricas como las proteínas, lípidos, hemicelulosa, celulosa y la lignina (MORENO CASCO, 2008).

Los microorganismos implicados en el compostaje necesitan que una serie de nutrientes específicos se encuentren en una forma química disponible, y a concentraciones adecuadas. Algunos de los nutrientes necesarios en mayor cantidad (macronutrientes) son el carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

El carbono es necesario para la síntesis celular, para la formación del protoplasma, así como la de 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 de la respiración. El nitrógeno es un elemento esencial para la reproducción celular debido a la naturaleza proteica del protoplasma. La calidad de un compost como abono, 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.

Además de C, N, P, K existen otros nutrientes presentes en menor cantidad (micronutrientes), que tienen un importante papel en la síntesis enzimática, en el metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte intra y extra celular, son el boro, calcio, cloro, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, selenio, sodio y zinc.

#### **2.4.3 Humedad**

La humedad condiciona la porosidad del medio. Un medio muy húmedo no permite la circulación del oxígeno y por lo tanto se pueden crear condiciones anaerobias. Un medio muy seco no permite la solubilización de la materia orgánica y por lo tanto se disminuye la actividad microbiana. La humedad máxima permisible para iniciar el proceso dependerá de las características físicas del material a

compostar. Para materiales fibrosos la humedad máxima permisible es del 75-90%, mientras que para material vegetal fresco oscila entre 50-60% (CASTELLS, 2005).

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 desecho de las reacciones que tienen lugar durante dicho proceso (MORENO CASCO, 2008).

La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa para que permita la circulación del oxígeno, como de los 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 anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaerobias se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso (MORENO CASCO, 2008).

El exceso de humedad puede ser reducido aumentando la aireación. A su vez con un buen control de la humedad y de la aireación puede llevarse a cabo el control de la temperatura. Por lo tanto, la humedad óptima depende del tipo de residuo, por ejemplo, para la paja de cereales está entre 75-85%, para astillas de madera entre 70-90% y para RSU entre 50-55% (HAUG, 1993).

La prueba práctica para medir el porcentaje de humedad en el sustrato se conoce como prueba de puño, la cual consiste en agarrar una pequeña cantidad de muestra con la mano. Posteriormente se le aplica fuerza, lo normal de un brazo. Entonces pueden suceder tres cosas: la primera, que al apretar la muestra, ésta comience a gotear: esto querría decir que hay un exceso de humedad. La segunda, que después de apretar la muestra, al abrir la mano, ésta quede humedecida pero no gotee y el material de la muestra forma una "pelotita" que no se desgrana. Sería la mejor situación posible, ya que la humedad sería la correcta. El tercer caso sería que, al abrir la mano después de apretar, ésta estuviese seca y la muestra se desarmase: esto indicaría una carencia de agua.

#### **2.4.4 Relación C/N**

Otro factor para el proceso de descomposición radica en el abastecimiento de sustancias nutritivas a los microorganismos. La de máxima importancia se le atribuye a la proporción C/N, dado que las otras sustancias nutritivas como fósforo, azufre, potasio, calcio, por lo general están disponibles en cantidad suficiente. La relación C/N, expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene un material. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica. Una relación adecuada entre estos dos nutrientes, favorecerá un buen crecimiento y reproducción para ellos (CASTELLS, 2005).

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 lo tanto se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35 (JHORAR *et al.*, 1991).

Cuando la relación C/N es superior a 35, la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono, el proceso se ralentiza por falta de nitrógeno disponible para la síntesis proteica, por lo que las bacterias deberán esperar la lisis de parte de ellas para poder disponer de

nitrógeno metabolizable de nuevo, su biomasa se recicla y la relación C/N tiende a disminuir. Cuando la relación C/N es inferior a 25, el nitrógeno está presente en exceso y la probabilidad de pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco en los gases emitidos es elevada (MORENO CASCO, 2008).

Esta emisión de amoníaco debe ser controlada, previniéndola con el ajuste de la relación C/N mediante la adición de sustrato rico en carbono biodegradable como por ejemplo hojas de árboles, paja o aserrín.

Tabla 1: Relación C/N de algunos materiales relacionados con la producción de compost.  
FUENTE: UMWELTSCHUTZ NORD ARGENTINA, 2004.

TIPO DE RESIDUO	RELACIÓN C/N	TIPO DE RESIDUO	RELACIÓN C/N
Restos de cocina	12:1 a 20:1	Hojas de árboles	30:1 a 60:1
Corte de césped	12:1 a 25:1	Paja de avena	60:1
Restos de verduras	13:1	Paja de trigo	100:1
Guano de gallina	13:1 a 18:1	Material leñoso	100:1 a 150:1
Guano de vaca	20:1	Aserrín fresco	100:1 a 200:1
Guano con pasto	25:1 a 30:1	Aserrín viejo	500:1
Remanentes de jardín	20:1 a 60:1	Papel	1000:1

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 maduro cuando la relación C/N < 20, aunque ésta es una condición necesaria pero no suficiente (MORENO CASCO, 2008).

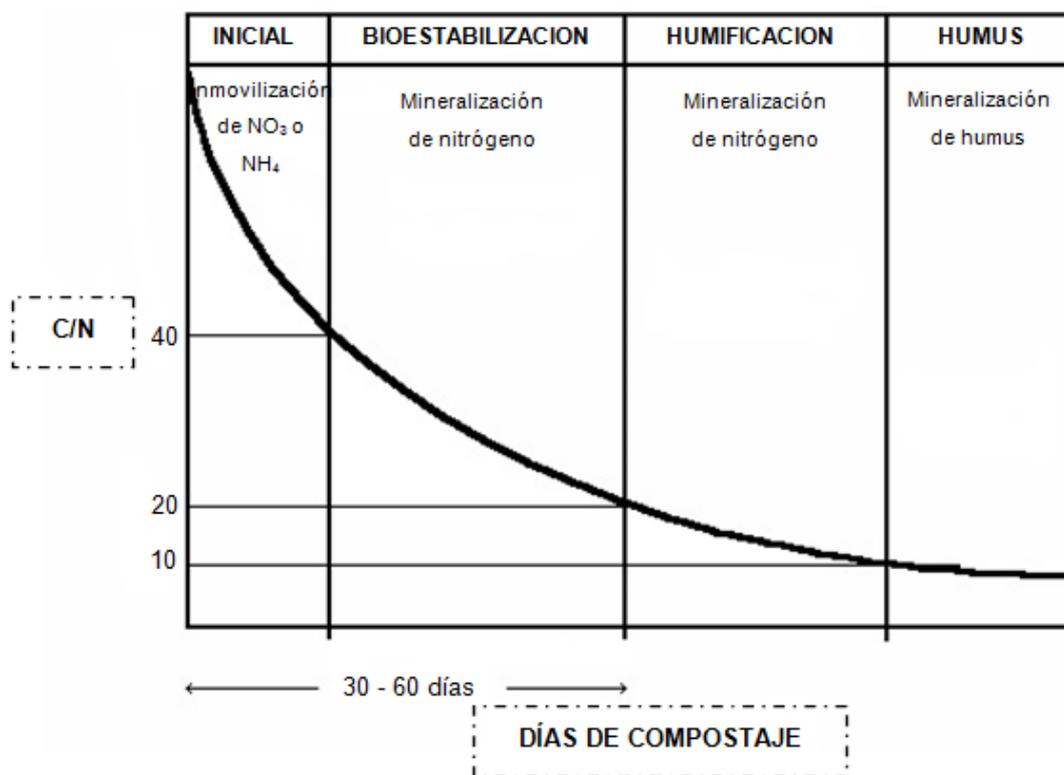


Figura 3: Evolución característica de la relación C/N durante el proceso de compostaje.  
FUENTE: Adaptado por RIVERO, F. según MORENO CASCO, 2008.

#### 2.4.5 Materia Orgánica

Durante el compostaje la masa de materia orgánica tiende a descender debido a su mineralización y 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. Este descenso de materia orgánica ocurre 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; en la segunda etapa, una vez consumidos los compuestos lábiles, otros materiales más resistentes como las ligninas se van degradando lentamente y transformando en compuestos húmicos (ZUCCONI *et al.*, 1987).

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 la de los materiales originales, confiriéndole a la masa características físicas y químicas distintas (HAUG, 1993).

#### 2.4.6 Temperatura

La medición de la temperatura durante el proceso de compostaje se efectúa para el control del mismo, así como también para el control y el manejo de la actividad biológica del material. De la temperatura se puede deducir si el material se está descomponiendo óptimamente y si se cumplen las condiciones de la higienización del material.

Al disponer el material que se va a compostar, si las condiciones son 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 del material en el núcleo de la pila. El síntoma más claro de la actividad microbiana es el aumento de la temperatura de la masa que se está compostando, por lo que la temperatura ha sido considerada como una variable e indicador fundamental en el control del compostaje (LIANG *et al.*, 2003).

El rango de temperaturas óptimas para la fase termófila se encuentra entre 45 y 60°C. Mantener temperaturas superiores puede inactivar los microorganismos responsables del proceso, y no llegar a los valores dados como óptimos implica no asegurar la higienización del producto. El tiempo para llegar a la temperatura máxima puede oscilar entre 2 y 10 días, y el tiempo de mantenimiento de esta temperatura puede ser de unos pocos días a unos pocos meses. Estos tiempos dependen de las características del material a compostar y del control realizado (CASTELLS, 2005).

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 nuevamente la temperatura inicial (MORENO CASCO, 2008).

Cada especie de microorganismo tiene un intervalo de temperatura óptima en el cual su actividad es mayor y más efectiva: 15-40°C para los microorganismos mesófilos y 40-70°C para los termófilos (SULER *et al.*, 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 temperatura de la pila.

### **2.4.7 pH**

El pH tiene influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. 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 de anaerobiosis se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH (MORENO CASCO, 2008).

El intervalo óptimo para el proceso de compostaje se encuentra entre 5,5 y 8. El rango óptimo para las bacterias se encuentra entre 6 y 7,5; mientras que los hongos toleran bien un rango entre 5,5 y 8. Importante es también el efecto producido sobre el nitrógeno amoniacal, el cual pasa a amoníaco y pH alto, favoreciendo su pérdida por volatilización (CASTELLS, 2005).

La evolución del valor del pH varía con el tiempo, presentando 3 fases. El pH inicial se encuentra usualmente entre 5 y 7. Durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH (<5) debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica, produciéndose una liberación de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio (7,5-8,5), debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas. Y en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón (SÁNCHEZ MONEDERO *et al.*, 2001).

### **2.4.8 Oxígeno**

Para el desarrollo deseado del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que intervienen en él son aerobios. La insuficiencia de oxígeno provoca que los microorganismos cambien su tipo de producción de energía hacia procesos fermentativos, muchos menos eficientes energéticamente, los cuales producen productos secundarios indeseables (metano y sustancias productoras de malos olores), no favorecen el aumento necesario de temperatura, por lo que sanitariamente el producto puede ser peligroso, y no se logra la estabilización biológica total (MORENO CASCO, 2008).

En el caso de procesos al aire libre, 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 0,5-2% (EKINCI *et al.*, 2004).

La porosidad de los materiales, el volteo periódico o un sistema de aireación forzada, son operaciones que favorecen buenas condiciones de aireación. Sin embargo, la aplicación de tales acciones no asegura un acceso completo del oxígeno a todas las partes del material.

## **2.5 Microbiología del proceso de compostaje**

La pila de compostaje puede definirse como un ecosistema ya que éste es sistema natural formado por un conjunto de organismos vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo) de tal forma que existe un flujo de energía que conduce a una estructura trófica claramente definida, diversidad biótica y ciclos de materiales. En este ecosistema (pila de compostaje) diversas poblaciones microbianas constituidas por bacterias, hongos, actinomicetos, degradan secuencialmente la materia orgánica en presencia de oxígeno generando un producto estable humificado junto con gases, agua y calor como

residuos del metabolismo microbiano. El tipo predominante de microorganismos depende de las condiciones nutricionales y ambientales, en cuyas variaciones intervienen sus propias actividades. El compostaje es una compleja interacción entre los restos orgánicos, los microorganismos, la aireación y la producción de calor. Es importante entender cómo influyen estos parámetros en el ecosistema microbiano para mejorar la eficiencia del proceso y permitir su control. Los microorganismos son los elementos clave del proceso (MORENO CASCO, 2008).

El conjunto de microorganismos que se desarrolla durante el compostaje puede afectar al proceso tanto positiva como negativamente. En el grupo de los microorganismos beneficiosos se encuentran los que biotransforman la materia orgánica en presencia de oxígeno, que conducen a la obtención de compost de calidad: son los microorganismos degradadores de compuestos contaminantes y los microorganismos que ejercen actividad antagónica frente a patógenos, que contribuyen a la actividad higienizante del compostaje. Entre los microorganismos indeseables o que pueden afectar negativamente al proceso se encuentran los implicados en la generación de olores y los patógenos (MORENO CASCO, 2008).

### 2.5.1 Diversidad microbiana

Durante el compostaje se desarrolla una gran variedad de microorganismos aerobios mesófilos, termotolerantes y termófilos, que incluyen bacterias, actinomicetos, hongos y levaduras.

A pesar de la heterogeneidad se puede afirmar que existe un patrón común en la evolución de la diversidad microbiana durante cada una de las fases del compostaje. En general, la biodiversidad decrece al aumentar la temperatura y vuelve a incrementarse una vez que desciende nuevamente. En cada ciclo de calentamiento/enfriamiento no se vuelven a alcanzar los mismos niveles que en la etapa anterior, debido a que los nutrientes disponibles se hacen más escasos a medida que avanza el proceso de estabilización de la materia orgánica (MORENO CASCO, 2008).

Las bacterias identificadas en compostaje incluyen diferentes especies agrupadas filogenéticamente. Los géneros bacterianos mesófilos más frecuentemente detectados en los procesos de compostaje son: *Cellulomonas*, *Chondrococcus*, *Thiobacillus*, *Aerobacter*, *Proteus* y *Pseudomonas*. Dentro de las bacterias termófilas encontramos especies de *Bacillus*. Respecto a los actinomicetos tenemos especies de *Streptomyces*, *Thermonospora*, *Micromonospora* (HARUTA *et al.*, 2005).

Las arqueas constituyen un grupo de procariontas que presentan características similares a bacterias aunque se encuentran separadas filogenéticamente de estas agrupadas en un dominio diferente: Archaea que incluye muchas especies que se desarrollan en ambientes extremos. En compostaje sólo se detectaron especies anaerobias productoras de metano (CAHYANI *et al.*, 2004).

Los géneros fúngicos más frecuentemente detectados durante compostaje son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Fusarium*. Las levaduras encontradas generalmente corresponden a los géneros *Cándida*, *Rhodotorula*, *Pichia*, *Torulopsis* y *Trichosporon* (MORENO CASCO, 2008).

### 2.5.2 Sucesión microbiana

Dependiendo del sustrato y de las condiciones en las que esté conservado, la microbiota inicial de los materiales a compostar es muy variable. Aunque la población inicial de microorganismos puede determinar la evolución del proceso, no es un factor limitante, ya que una vez que se adecuan los sustratos se producen recolonizaciones microbianas desde el entorno de la pila de compostaje.

### **2.5.2.1 Fase mesófila inicial**

La fase mesófila inicial es la parte más dinámica del compostaje en la que se incrementa rápidamente la temperatura (de 10 a 40°C sobre su nivel inicial), el pH experimenta amplias variaciones y se degradan los compuestos orgánicos más simples. Inicialmente los sustratos están a temperatura ambiente y comienzan a actuar bacterias y hongos mesófilos y termotolerantes que utilizan rápidamente sustancias carbonadas solubles y de fácil degradación (azúcares y aminoácidos), ocasionando una disminución en el pH, como consecuencia de la producción de ácidos orgánicos. Los microorganismos que alcanzan mayores niveles en esta fase son las bacterias con metabolismo oxidativo y fermentativo, principalmente bacterias Gram negativas y productoras de ácido láctico (RYCKEBOER *et al.*, 2003), que crecen rápido a expensas de compuestos fácilmente degradables. La actividad metabólica de los microorganismos en esta fase provoca un aumento de temperatura, lo que produce la transición de microbiota mesófila a termófila cuando se alcanzan 42°C aproximadamente, comenzando la fase termófila.

### **2.5.2.2 Fase termófila**

En esta fase proliferan exclusivamente microorganismos termotolerantes y termófilos como actinomicetos y diversos *Bacillus* termófilos y bacterias Gram negativas. Los microorganismos no termotolerantes, incluyendo patógenos y parásitos, son inhibidos durante esta fase. Los hongos y levaduras disminuyen notablemente desde el inicio de la fase termófila y son eliminados completamente a partir de los 60°C.

En las primeras etapas de esta fase, la microbiota mesófila es inhibida por la temperatura. Una vez que los microorganismos termófilos alcanzan un cierto número, el ritmo de incremento de temperatura se recupera. En el inicio de la fase termófila, cuando los nutrientes fácilmente asimilables han sido retirados, comienzan a predominar los actinomicetos, que junto con algunos *Bacillus*, comienzan a metabolizar proteínas, incrementando la liberación de amoníaco con la consiguiente alcalinización. Como consecuencia de la degradación de polímeros se liberan nuevas sustancias monoméricas simples que pueden ser utilizadas por otros microorganismos. Por lo tanto, la actividad microbiana sigue siendo intensa y la temperatura sigue aumentando hasta superar los 60°C.

Con temperaturas mayores a 60°C, la degradación es realizada exclusivamente por bacterias termófilas. A estas temperaturas, el calor inhibe a los microorganismos y también actúa limitando el suministro de oxígeno. Esto provoca una disminución de la actividad microbiana y como consecuencia, una caída en la temperatura (MORENO CASCO, 2008).

### **2.5.2.3 Etapas de enfriamiento y maduración**

A medida que la concentración relativa de compuestos orgánicos resistentes aumenta, la velocidad de descomposición y el consumo de oxígeno decrecen. Comienza una etapa de enfriamiento en la cual la temperatura empieza a disminuir.

El proceso de compostaje continúa gracias a bacterias esporógenas y actinomicetos, la celulosa y hemicelulosa inician su descomposición. En esta última fase, polímeros de la celulosa y lignina quedan parcialmente alterados.

En la etapa de maduración tienen lugar procesos de biopolimerización, para formar moléculas complejas y estables; microorganismos mesófilos y diversa microfauna colonizan el material para obtener un compost completamente estabilizado y parcialmente humificado.

Estas etapas están caracterizadas por el crecimiento de una nueva comunidad mesófila diferente a la de la fase inicial. En esta comunidad predominan hongos y actinomicetos capaces de degradar compuestos complejos, que recolonizan el material desde el entorno o bien proceden de germinación de esporas que resistieron la fase termófila.

Si bien las bacterias mesófilas se encuentran en bajo número, su diversidad es mayor que en las fases anteriores y presentan nuevas actividades importantes para la maduración del compost. Estas bacterias, están implicadas en la oxidación de la materia orgánica y participan también en la oxidación del hidrógeno, amonio, nitrito y sulfuros, en la fijación del nitrógeno, reducción de sulfatos, producción de nitrito a partir de amonio bajo condiciones heterotróficas.

A medida que avanza la maduración, la comunidad se hace más estable y compleja, apareciendo microorganismos típicos de este hábitat como *Arthrobacter*. A la actividad de hongos y bacterias durante la maduración, se suma la de protozoos, nematodos que contribuyen a la degradación y estabilización final de la materia orgánica (MORENO CASCO, 2008).

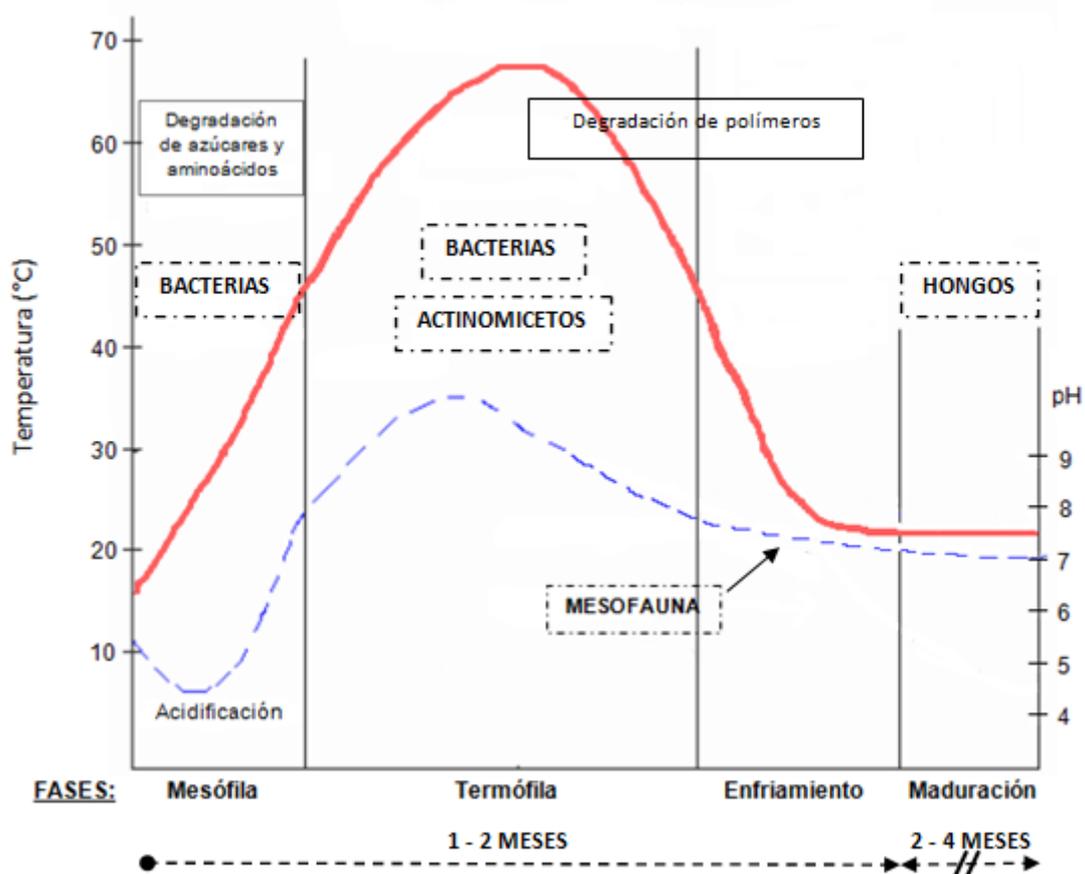


Figura 4: Etapas del proceso de compostaje donde se muestra la evolución de la temperatura (°C, línea roja continua), pH (línea azul, discontinua) y los diferentes microorganismos y procesos involucrados en cada etapa. FUENTE: Adaptado por RIVERO, F. según VARELA *et al.*, 2011.

### 2.5.3 Microorganismos beneficiosos

El conjunto de microorganismos presentes durante el compostaje puede beneficiar el proceso ya sea a través de los que son capaces de biotransformar la materia orgánica en presencia de oxígeno, los degradadores de compuestos contaminantes y los microorganismos que ejercen actividad antagónica frente a patógenos.

Las variaciones térmicas durante el compostaje permiten la sucesión de poblaciones microbianas, contribuyen a eliminar microorganismos patógenos y a modificar las propiedades fisicoquímicas de los sustratos. Algunos microorganismos que pueden considerarse beneficiosos durante el proceso de compostaje son bacterias como *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., el hongo *Aspergillus* y los actinomicetos *Arthrobacter* spp. y *Streptomyces* spp. (ZHANG *et al.*, 2006).

## 2.5.4 Microorganismos perjudiciales

### 2.5.4.1 Generadores de olores no deseables

Los malos olores son provocados por la generación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoniacales. Ambos tipos de compuestos pueden ser producto del metabolismo microbiano y son indicativos de actividades microbianas indeseables como consecuencia de fallas en la operación o preparación del material original (MORENO CASCO, 2008).

Los COV son coproductos de diferentes rutas metabólicas del metabolismo microbiano secundario y pueden ser productos residuales o sustancias señal. Se producen en condiciones de anoxia y, mayoritariamente, en las primeras fases del compostaje, en las que la elevada actividad microbiana requiere un mayor consumo de oxígeno. Las bacterias son los principales microorganismos productores de tales compuestos, pero algunos hongos también pueden estar implicados. Las bacterias emiten predominantemente compuestos sulfurados, hidrocarburos y alcoholes (FALL y COPLEY, 2000).

La producción de amoníaco está más asociada a un exceso de compuestos nitrogenados en el material de partida. Una relación C/N menor de 20 en los sustratos de partida favorece la producción de tal compuesto, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas.

### 2.5.4.2 Patógenos y control

Muchos materiales que se utilizan para compostaje son portadores de patógenos de origen humano, animal o vegetal, ya sea virus (Hepatitis A, Enterovirus), hongos y bacterias (*Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia coli*) como parte de su microbiota natural.

Gran parte de estos patógenos son eliminados durante el compostaje por inactivación a alta temperatura durante un determinado periodo de tiempo.

La eliminación de patógenos durante el compostaje es resultado de complejas interacciones microbianas entre las que se destacan las siguientes:

- Altas temperaturas generadas en la fase termófila
- Producción de compuestos antimicrobianos tales como los compuestos fenólicos producidos durante la degradación del material ligno-celulósico
- Actividad lítica de las enzimas microbianas
- Producción de antibióticos por parte de antagonistas microbianos
- Colonización del compost con diferentes microorganismos que compiten con los patógenos por los nutrientes
- Pérdida natural de la viabilidad del patógeno con el transcurso del tiempo

La causa considerada de mayor importancia para la eliminación de microorganismos patógenos es el aumento de temperatura. Este factor afecta de distinta forma a cada grupo microbiano. Por esta razón, no sólo es necesario alcanzar altas temperaturas durante el proceso, sino que es imprescindible que sus

niveles se prolonguen cierto tiempo. Se recomienda que al menos se alcancen 55°C durante un mínimo de 3 días (EPA, 2003).

Un compost cumpliendo con normas de calidad como por ejemplo RAL en el caso de Alemania, TQC en Bélgica, FAC en Suiza, IRAM en Argentina, debe estar exento de patógenos tanto humanos como vegetales para que pueda ser aplicado sin implicar riesgos medioambientales. El término “eliminación” en este contexto debería entenderse como la “reducción en el número de propágulos del patógeno, de modo que éste se encuentre por debajo del límite de detección del método utilizado” (NOBLE y ROBERTS, 2003).

Los microorganismos sobreviven en un determinado hábitat porque son capaces de colonizarlo y utilizar los recursos contenidos en el mismo. El compostaje es un proceso basado en el control de factores selectivos de la ecología microbiana. Diversos factores bióticos y abióticos, relacionados entre sí, condicionan la sucesión de ambientes diferentes necesarios para la formación de compostaje.

## **2.6 Bioquímica del proceso de compostaje**

### **2.6.1 Descomposición, mineralización y humificación**

La materia orgánica es biotransformada en condiciones aerobias, mediante reacciones de óxido-reducción catalizadas por enzimas microbianas. En este proceso, los microorganismos utilizan la materia orgánica como nutriente para su desarrollo, produciendo su descomposición hasta moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas, y la humificación, en las que se crean nuevas macromoléculas a partir de moléculas sencillas formadas en la descomposición, o se transforman de alguna de las moléculas iniciales. El proceso en conjunto produce calor, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y humus, cuya característica más destacable es su mayor resistencia a posteriores procesos de descomposición.

Aunque los productos finales de la descomposición aeróbica y mineralización son los mismos (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>), la descomposición implica la formación de una serie de compuestos orgánicos intermedios, que no se producen en la mineralización, por lo que las sustancias húmicas se pueden originar a partir de procesos de descomposición y no de mineralización (TAN, 2000).

La humificación es un proceso básico durante el compostaje de la materia orgánica, y a medida que pasa el tiempo el porcentaje de sustancias húmicas se incrementa frente al total de materia orgánica (GOYAL *et al.*, 2005).

### **2.6.2 Requerimientos nutricionales**

La mayoría de los microorganismos utilizan una serie de macro y micronutrientes en formas químicas sencillas, que pueden atravesar las membranas plasmáticas mediante diferentes mecanismos de transporte. Estos nutrientes deben encontrarse en las formas químicas que son asimilables por los microorganismos, y si esto no sucede, deben ser biotransformados en compuestos metabolizables. Dentro de las rutas catabólicas las diferentes fuentes nitrogenadas, carbonadas, son biodegradadas para obtener la energía necesaria que permita la construcción de polímeros celulares durante el anabolismo (GOYAL *et al.*, 2005).

Cuando las fuentes de nutrientes son polímeros de origen vegetal o animal, éstos deben ser degradados por una serie de enzimas extracelulares que son producidas por un número limitado de microorganismos. Las enzimas secretadas al medio externo que catalizan la hidrólisis de los polímeros

como la celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, son fundamentales para que estas sustancias puedan biodegradarse y biotransformarse durante el compostaje. Una vez producida la hidrólisis de las macromoléculas a sus monómeros, éstos son transportados al interior de los microorganismos, y se produce su metabolización por medio de enzimas intracelulares (MORENO CASCO, 2008).

Las enzimas secretadas por estos microorganismos producen la liberación de las fuentes básicas de nutrientes, que permiten el crecimiento de estas especies, así como de otros microorganismos que pueden utilizar esas fuentes básicas y otros nutrientes presentes durante el compostaje, capaces de degradar los materiales presentes en la mezcla, para dar lugar al compost final.

La degradación de la celulosa está catalizada por las celulasas que constituyen un sistema enzimático complejo, que participan en diferentes transformaciones durante la hidrólisis del polímero. Se describen tres tipos mayoritarios de actividades enzimáticas de este complejo: endoglucanasas que cortan internamente las cadenas de celulosa en diferentes sitios produciendo oligosacáridos de diferentes tamaños; exoglucanasas que producen una liberación progresiva de glucosa o celobiosa como productos mayoritarios a partir de la celulosa o los oligosacáridos producidos por las endoglucanasas; y B-glucosidasas responsables de catalizar la degradación de la celobiosa y otros oligómeros relativamente pequeños a glucosa (LYND *et al.*, 2002).

La celulosa y hemicelulosa se encuentran asociadas y embebidas dentro de la lignina, lo que limita la acción de celulasas y hemicelulasas, es decir que la lignina debe ser degradada, lo que implica la necesidad de enzimas ligninolíticas.

Otros componentes vegetales como ceras, almidones y sustancias pécticas, también son degradados por diversas enzimas secretadas por microorganismos.

Las proteínas son degradadas por proteasas y peptidasas que cortan en diferentes enlaces peptídicos produciendo aminoácidos, que pueden ser utilizados directamente o transformados, y que junto con los nitratos y el amonio presentes son la fuente fundamental de compuestos nitrogenados (MORENO CASCO, 2008).

## **2.7 Consideraciones generales de los efectos físico-químicos de la aplicación de compost en suelos**

La aplicación de compost en el suelo tiene un efecto doble ya sea como enmienda orgánica muy lentamente biodegradable y como abono con liberación de nutrientes. El uso de enmiendas orgánicas puede mejorar las propiedades físicas (textura estructura y porosidad) y químicas del suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico); constituyen una fuente de carbono y otros nutrientes, lo cual favorece la actividad microbiana y mejora la estructura del suelo. Los abonos proveen nutrientes de aprovechamiento inmediato para las plantas que son absorbidos directamente.

Su utilización también aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la capacidad tampón (manteniendo un pH más estable), y la actividad microbiológica.

Además de estos beneficios, se pueden identificar los siguientes:

- Recuperación y mejora del suelo: La utilización del compost como enmienda orgánica o producto reconstituidor de materia orgánica en los terrenos de labor tiene un gran potencial e interés en nuestro país, en especial en el secano, donde los suelos poseen un mínimo porcentaje de materia orgánica

(aproximadamente 0,2%), ya que la presencia de la misma en el suelo en proporciones adecuadas es fundamental para asegurar la fertilidad y evitar la desertización.

- Mejora las propiedades físicas del suelo: La materia orgánica contribuye favorablemente a mejorar la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, aumenta la permeabilidad hídrica y gaseosa, disminuye la erosividad del suelo y contribuye a aumentar la capacidad de retención hídrica del mismo mediante la formación de agregados.

- Mejora las propiedades químicas: La materia orgánica aporta macronutrientes: N, P, K y micronutrientes, y mejora la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Esta propiedad consiste en absorber los nutrientes catiónicos del suelo, poniéndolos a largo plazo a disposición de las plantas, evitándose de esta forma la lixiviación. Por otra parte, los compuestos húmicos presentes en la materia orgánica forman complejos estables y el suelo puede almacenar más humedad.

- Mejora la diversidad y actividad biológica del suelo: La materia orgánica del suelo actúa como fuente de energía y nutrición para los microorganismos presentes en el suelo. Estos viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización. Una población microbiana activa es índice de fertilidad de un suelo.

### 3. ASPECTOS TÉCNICOS EN EL DESARROLLO Y CONTROL DEL COMPOSTAJE

Un proceso de compostaje debe contar con las siguientes etapas operativas:

- Selección de materiales
- Caracterización
- Definición de tecnología a aplicar
- Recepción
- Pretratamiento: Separación de materiales impropios, trituración, mezcla y homogeneización
- Proceso de compostaje propiamente dicho: con las fases de descomposición y maduración
- Postratamiento: operaciones de cribado, separación de materiales impropios remanentes, almacenaje y expedición
- Reincorporación de material sobrante a un nuevo proceso de compostaje.

Debido a la heterogeneidad de las materias primas a tratar, a la necesidad de reducir la presencia de potenciales contaminantes, de proporcionarle al sistema de compostaje una materia suficientemente homogénea, porosa, con la humedad adecuada y con un tamaño de partícula correcto; son necesarios unos pretratamientos (generalmente tratamientos mecánicos) (MORENO CASCO, 2008).

También al final del proceso de compostaje es necesario un nuevo tratamiento mecánico que permita separar los restos de fracciones indeseables que puedan acompañar al compost maduro y obtener de esta manera un compost de calidad.

#### 3.1 Clasificación de las tecnologías

Los sistemas de compostaje se diferencian por la forma de incorporación del aire, el control de la temperatura, la mezcla o el volteo del material y la duración del proceso. La selección del sistema depende de las necesidades, los recursos disponibles y las condiciones ambientales.

Existen dos métodos fundamentales de compostaje: sistemas abiertos y sistemas cerrados en función del aislamiento del material a compostar con respecto al exterior.

El método más simple es el sistema abierto, que consiste en apilar el material en espacios aireados, el cual es amontonado en forma que asemeja pirámides alargadas. Requiere de volteos mecánicos o manuales para promover la aireación. La estabilización del material, entendida como un estado estacionario en el que se alcanza el equilibrio de la actividad biológica y constancia en la temperatura, usualmente ocurre dentro de 4 o 6 semanas.

Un método alternativo de compostaje involucra mezclados mecánicos y sistemas cerrados de aireación. Con un mejor control sobre el mezclado, aireación y temperatura, el proceso de estabilización puede ser finalizado en un menor período de tiempo.

##### 3.1.1 Proceso de aireación

La aireación tiene lugar pasivamente o por el movimiento forzado de aire, ya sea por inyección o succión de  $O_2$ .

En el caso de la aireación pasiva (aireación natural), tiene lugar por difusión molecular, viento y convección térmica. El primero de los mecanismos tiene lugar siempre que exista una diferencia de concentración entre dos medios. Este proceso funciona constantemente, es muy lento y tiene un efecto

escaso en las pilas (HAUG, 1993). El viento puede aportar más significativamente; y el mecanismo de convección térmica es el principal responsable de la aireación pasiva en la mayoría de los sistemas de compostaje (LYNCH y CHERRY, 1996). El calor generado durante el proceso del compostaje aumenta la temperatura de los gases presentes en los materiales, disminuyendo su densidad. Los gases calientes son liberados de la masa, creando un vacío que provoca que el aire fresco penetre.

En la mayoría de los sistemas de compostaje en los que se lleva a cabo el proceso de aireación pasiva implican una agitación o volteo periódico de los materiales. El efecto del volteo con mayor influencia en la aireación es la reconstrucción del espacio poroso en el material que facilita los procesos de difusión y convección (MORENO CASCO, 2008).

En cambio, en la aireación forzada el aire se suministra mecánicamente, mediante ventiladores o a través de la aspiración de aire que se mueve por los materiales que se están compostando. El aire puede suministrarse por presión positiva o por presión negativa (absorbiendo el aire a través de los materiales del exterior). En estos casos, la forma de aporte de aire puede ser continua o intermitente. La aireación forzada suele ser controlada en base a la marcha de la temperatura de los materiales que se están compostando; el flujo de aire es activado o incrementado cuando la temperatura del proceso sobrepasa la temperatura fijada.

### **3.1.2 Sistemas abiertos**

Los sistemas abiertos de compostaje suelen ser de bajo costo y tecnología sencilla, aplicables a zonas en las que la disponibilidad de terreno sea alta. Las características meteorológicas de la zona son determinantes para el desarrollo del proceso (MORENO CASCO, 2008).

Consiste en acomodar la mezcla de las materias primas en largas y estrechas pilas o hileras que son volteadas o aireadas regularmente. Las medidas óptimas oscilan entre 1-3 metros de altura, por 2-4 metros de ancho, siendo la longitud variable. Una correcta construcción de la pila, permite al aire difundirse hasta el centro.

Dentro de los sistemas abiertos, podemos encontrar las siguientes grandes tipologías:

- Hileras con volteo: los materiales se agrupan en filas de aproximadamente 25 metros de longitud, con una sección transversal triangular o trapezoidal, con una altura entre 1 y 3 metros y una base con un ancho de 2 a 4 metros. Se voltean mediante maquinaria adecuada (CASTELLS, 2005). El volteo mezcla y combina los materiales, homogeneizándolos; libera los gases y el calor, distribuye el agua, los nutrientes y los microorganismos e intercambia material de la superficie con el material más caliente y pobre en oxígeno.
- Pilas estáticas aireadas: el material se agrupa en pilas de dimensiones semejantes a las de las hileras con volteo y se disponen sobre plataformas con sistema de ventilación por tubos, conectados a un sistema que aspira o insufla aire a través de la pila (MORENO CASCO, 2008).

### **3.1.3 Sistemas cerrados**

En los sistemas cerrados el material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos y ventiladores. Las diferentes variables de proceso (humedad, pH, temperatura, nutrientes, cantidad de gas) pueden ser registradas, controladas y optimizadas.

Generalmente son dispositivos estancos de diversos tipos: túneles, camas, contenedores o en tambor. Entre los sistemas cerrados de compostaje podemos encontrar las siguientes clasificaciones:

- Trincheras: se desarrolla en una serie de canales o trincheras que tienen entre 3 y 5 metros de ancho, con paredes entre 2 y 3 metros de altura y la longitud oscila entre los 60 y 140 metros. Estos canales se encuentran abiertos por arriba y con dispositivos que permiten la circulación de una máquina volteadora por encima de ellos. A su vez, la parte inferior de la trinchera puede disponer de un sistema de insuflado o succión de aire (CASTELLS, 2005).
- Túneles: implica la construcción de contenedores de hormigón u otro material de unos 3 metros de alto por 4 de ancho y 25 metros de fondo. El contenedor está dotado de un sistema de aireación forzada, normalmente a través de ranuras en el suelo (MORENO CASCO, 2008). Este sistema combina la sencillez de las pilas estáticas aireadas con la ventaja del proceso en reactor cerrado, permitiendo el control de todas las variables y el tratamiento de gases elevados.
- Reactores: existe una gran variedad de diseños en reactores y la mayoría implica la utilización de elementos mecánicos móviles. Podemos encontrar reactores horizontales continuos de flujo pistón en los cuales el movimiento de la masa se realiza mediante pistones hidráulicos o mediante movimiento de la base sobre rieles. También tenemos reactores verticales continuos donde la alimentación se realiza por la parte superior y se va retirando producto compostado por la parte inferior (CASTELLS, 2005).

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL COMPOST**

### **4.1 Caracterización de la zona de estudio**

La Facultad de Ciencias y Tecnología (FCT) de la Universidad Estadual Paulista (UNESP) fue creada en 1957, con sede en la ciudad de Presidente Prudente, en el interior del estado de San Pablo.

Actualmente, la FCT tiene nueve departamentos de enseñanza, 206 docentes, 230 trabajadores técnico-administrativos, 2.930 alumnos regulares de grado y 745 de posgrado.

Presidente Prudente es un municipio brasileiro ubicado a 500 km al Oeste de la ciudad de San Pablo. Tiene una superficie de 562.107 km<sup>2</sup> y una población estimada de 207.625 habitantes.

Los suelos son clasificados como arenosos, con características agrícolas, lo que los torna aptos para diversos cultivos. El clima de Presidente Prudente es caracterizado como tropical lluvioso, con disminución de lluvias en el invierno y temperatura media anual de 23,6°C. Los meses más calurosos son enero y febrero, con una temperatura media mensual de 26°C, siendo la media mensual máxima de 31°C y la mensual mínima de 21°C. El mes más frío, julio, posee una media de 20°C.

La precipitación media anual es de 1.256,5 mm, siendo julio el mes más seco y enero el más lluvioso, con media mensual de 206 mm.

### **4.2 Muestreo de los Residuos Orgánicos**

En el presente trabajo fueron probados dos tipos de compuestos orgánicos provenientes del compostaje de los residuos orgánicos alimenticios de las cantinas (sin carnes) y de los residuos de poda de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FCT/UNESP).

La mayor parte de los residuos orgánicos generados por las cantinas de la FCT se componen principalmente de cáscaras de frutas y las sobras de comida, como hortalizas, verduras y arroz. En entrevistas efectuadas con el personal de las cantinas y mediante la realización de un pesaje diario a lo largo de una semana tipo con actividad administrativa y académica promedio, antes de comenzar con la colecta de los residuos, fue posible estimar la generación de unos 25 kg de residuos orgánicos (sin carnes) al día.

Los residuos orgánicos del campus provenientes de la poda y desmalezado son en su mayoría de pastos (mayor volumen), hojas y ramas. De acuerdo con los empleados responsables de la poda y desmalezado, en función principalmente de la frecuencia de lluvias se realizan 5 grandes mantenimientos del campus, además de los efectuados mensualmente, con una producción aproximada de 2.000 kg de pastos y hojas por mantenimiento del campus (10.000 kg anuales).

La colecta de los residuos de la cantina (RC) fue realizada 5 veces a la semana durante 3 semanas de modo de obtenerse una muestra representativa en relación a los residuos generados. Los residuos de la poda y desmalezado (RP) fueron colectados luego de finalizado uno de los periodos de limpieza de la FCT- UNESP (fines de febrero), habiéndose observado a lo largo de la colecta, predominancia de los residuos del desmalezado.

Ambos tipos de residuos (RC y RP) fueron almacenados temporalmente para poder trasladarlos (no superando una demora de 24 horas) en baldes plásticos de 20 litros (altura: 37,5 cm, diámetro: 30 cm) completamente llenados sin tapar antes de ser utilizados en el compostaje.

Los residuos de las cantinas y de poda fueron desintegrados en un triturador eléctrico con cuchillas de marca CID35 SL, que presentaba en su abertura final un diámetro de 35 mm. Esta abertura final, ubicada en la parte inferior del triturador, permitía un mejor manejo y dominio de los residuos. (Foto 1).



Foto 1: Triturador eléctrico utilizado para la desintegración de los residuos.  
FUENTE: Elaboración propia

Se realizó la desintegración de los residuos a través del triturador para poder disminuir el tamaño promedio de las partículas, con el fin de obtener una estructura de porosidad adecuada para evitar la compactación de las unidades de compostaje y mejorar la capacidad de intercambio gaseoso. (Foto 2).

Se recomienda que la unidad de compostaje esté conformada por residuos cuyo tamaño varíe entre 3 mm y 50 mm (IRAM 29556-1, 2011).



Foto 2: Residuos de las cantinas triturados.  
FUENTE: Elaboración propia.

Fueron estudiados dos sistemas diferentes de tratamiento: uno abierto, en hilera convencional de mezcla manual y el otro cerrado, en un reactor aireado constituido por un tambor de hierro de 200 litros, con perforaciones laterales en diferentes alturas, para que el compuesto sea aireado homogéneamente con la ayuda de un compresor marca SCHULZ BRAVO (modelo CSL 10 BR/100L) con 2 HP de potencia y 100 litros de reservorio de aire con inyección de aire comprimido (aireación forzada).

En ambos sistemas de tratamiento, según el procedimiento planteado por la Profesora Dra. María Cristina Rizk (responsable de la disciplina de Gerenciamiento de Residuos Sólidos en la FCT-UNESP), fueron producidos compuestos orgánicos con las siguientes proporciones de residuos:

- Proporción 1: 30% residuos de poda (RP) + 70% residuos orgánicos alimenticios de las cantinas (RC)
- Proporción 2: 50% residuos de poda (RP) + 50 % residuos orgánicos alimenticios de las cantinas (RC)
- Proporción 3: 70% residuos de poda (RP) + 30% residuos orgánicos alimenticios de las cantinas (RC).

Los compuestos orgánicos producidos en los dos sistemas de tratamiento y en las tres proporciones de mezcla de residuos, fueron caracterizados de acuerdo con la cantidad de carbono orgánico total, pH, materia orgánica, humedad, nitrógeno total (método Kjeldhal), relación C/N, macro y micronutrientes.

A partir de las sugerencias de la Profesora Dra. María Cristina Rizk se prescindió la realización de mediciones constantes de temperatura, humedad y del control de patógenos, para poder focalizar y hacer hincapié en las características físico-químicas anteriormente mencionadas.

#### **4.3 Compostaje convencional (manual)**

El sistema de compostaje convencional fue realizado con tres hileras colocadas sobre lonas de polietileno de manera de impermeabilizar la superficie del suelo y así evitar infiltraciones. Según la metodología sugerida por la Profesora Dra. María Cristina Rizk, se utilizaron en total 100 kg de residuos en cada una de las tres hileras colocados en capas intercalando 15 cm de residuos de poda y 5 cm de residuos de las cantinas. (Foto 3).



Foto 3: Comienzo del montado de hileras convencionales intercalando residuos de poda y alimenticios.  
FUENTE: Elaboración propia.

Las hileras tuvieron las siguientes dimensiones aproximadas: 1,5 metros de largo, 1 metro de ancho y entre 60 centímetros y 1 metro de alto. (Foto 4).



**Foto 4: Montado de las hileras convencionales.**  
**FUENTE: Elaboración propia.**

Se utilizaron las siguientes proporciones en cada una de las tres hileras del compostaje convencional: hilera 1 con 70% RP y 30% RC; hilera 2 con 50% RP y 50% RC; y la hilera 3 con 30% RP y 70% RC. (Foto 5).



**Foto 5: Hileras del compostaje convencional montadas. De derecha a izquierda: hilera 1 con 70% RP y 30% RC; hilera 2 con 50% RP y 50% RC; hilera 3 con 30% RP y 70% RC.**  
**FUENTE: Elaboración propia.**

El mezclado fue efectuado una vez cada cinco días manualmente: con una pala se desarmaba cada una de las hileras y se volvía a armar al lado de la anterior. Antes de desarmarse cada hilera se realizaban riegos en el material. En el caso de precipitaciones, las hileras eran cubiertas con lonas impermeables para evitar el acceso del agua y no interferir en el proceso.

Después de 90 días, según lo establecido e indicado por la Profesora Rizk, al final del proceso de compostaje, las muestras fueron caracterizadas físico-químicamente en el Laboratorio de Geología, Geomorfología y Recursos Hídricos de la FCT-UNESP, en términos de pH, humedad, materia orgánica total, residuo mineral total, carbono orgánico, nitrógeno total, potasio, fósforo, relación C/N y análisis granulométrico, cuyos métodos de análisis serán presentados en el punto 4.5 (Métodos Analíticos)

Como puede observarse en la foto 6, es notable la disminución del volumen de las tres hileras del compostaje manual.



**Foto 6: Hileras del compostaje convencional luego de 90 días. De derecha a izquierda: hilera 1 con 70% RP y 30% RC; hilera 2 con 50% RP y 50% RC; hilera 3 con 30% RP y 70% RC.  
FUENTE: Elaboración propia.**

#### **4.4 Compostaje mecánico (reactor)**

El compostaje mecánico (estático) fue realizado en reactores aireados constituidos por tambores limpios e impermeables de hierro de 200 litros cada uno, con una altura de 90 cm, los cuales poseían perforaciones laterales en diferentes alturas (30 y 60 cm) para que el compuesto fuera aireado por completo. (Foto 7).



**Foto 7: Disposición de los reactores del compostaje mecánico.  
FUENTE: Elaboración propia.**

La ventilación se realizó diariamente con intervalos de 7 horas y 45 minutos con 15 minutos de encendido de aireación forzada durante 60 días. De esta manera el compuesto fue aireado por completo. Se efectuó con la ayuda de un compresor marca SCHULZ BRAVO (modelo CSL 10 BR/100L) con 2 HP de potencia y 100 litros de reservorio de aire con una capacidad de inyección de 283 litros/min. (Foto 8).

El mecanismo de encendido/apagado de la aireación forzada fue realizado mediante un temporizador de 24 horas para encendido y apagado automático marca GENERALI LINE (modelo A414-US23).

Se realizaron riegos periódicos (una vez cada cinco días) en el material de cada uno de los reactores.



**Foto 8: Compresor de aire utilizado en el compostaje mecánico.**  
**FUENTE: Elaboración propia.**

Las proporciones estudiadas en el sistema mecánico de igual forma que en el sistema convencional fueron: 70% RP y 30% RC; 50% RP y 50% RC; 30% RP y 70% RC, con una masa total de 70 kg por reactor debido al espacio disponible de los tambores. Durante el montaje, los residuos de la proporción 70% RP y 30% RC fueron dispuestos en capas intercalando 12 cm de residuos de poda y 5 cm de residuos de las cantinas, la proporción de 50% RP y 50% RC intercalando capas de 10 cm de residuos de poda y 10 cm de residuos de las cantinas, y la proporción de 30% RP y 70% RC intercalando capas de 12 cm de residuos de las cantinas y 5 cm de residuos de poda. La disposición de los mismos puede observarse en la foto 9.



**Foto 9: Disposición de los residuos en capa en reactor (compostaje mecánico).**  
**FUENTE: Elaboración propia.**

Al finalizar el proceso las muestras, del mismo modo que en el compostaje convencional, fueron caracterizadas físico-químicamente en términos de pH, humedad, materia orgánica total, residuo mineral total, carbono orgánico, nitrógeno total, potasio, fósforo, relación C/N y análisis granulométrico en el Laboratorio de Geología, Geomorfología y Recursos Hídricos de la FCT-UNESP, cuyos métodos de análisis serán presentados en el punto 4.5 (Métodos Analíticos).

#### 4.5 Métodos Analíticos

Tanto el abono producido en las hileras, como el producido en los reactores fueron tamizados antes de su uso. Para eso fue necesario dejar los compuestos secando al sol durante un tiempo promedio de 2 días según lo indicado por la Profesora Dra. María Cristina Rizk (responsable de la disciplina de Gerenciamiento de Residuos Sólidos en la FCT-UNESP). (Foto 10).



Foto 10: Secado de los compuestos producidos en hileras y reactores.  
FUENTE: Elaboración propia.

Después de secados, los compuestos fueron tamizados en tamices de malla de acero galvanizado de 6,35 mm de diámetro y aro de madera (lo que corresponde a un tamiz serie gruesa 18-200 N° ¼ según la clasificación del Instituto Argentino de Normalización y Certificación: IRAM), obteniéndose los compuestos orgánicos listos para ser utilizados en la siembra. (Fotos 11 y 12).



Foto 11: Compost siendo tamizado para luego ser utilizado en siembra.  
FUENTE: Elaboración propia.



**Foto 12: Compost finalizado.**  
**FUENTE: Elaboración propia.**

#### 4.5.1 pH

Las mediciones de pH fueron realizadas en un pHmetro de pie, marca HANNA - modelo HI-221. El pH fue determinado en solución de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), conforme el procedimiento establecido por KIEHL, 1985, indicado por la Profesora Dra. María Cristina Rizk.

Se prepararon suspensiones acuosas de los diferentes tipos de abonos en una proporción de 1:2,5 (sólido:líquido) con solución de cloruro de calcio 0,01 M (relación 1:2,5: pesar 40 g de suelo y agregar 100 ml de solución). Las suspensiones se agitaron durante 5 minutos, se dejaron reposar durante una hora y luego se llevaron a la determinación del pH.

#### 4.5.2 Humedad

La determinación del porcentaje de humedad, materia orgánica, cenizas totales (residuo mineral) y carbono orgánico fueron realizadas por el método de calcinación también propuesto por KIEHL, 1985.

El porcentaje de humedad se determinó por el método gravimétrico: la muestra fue secada en estufa con aire forzado a  $105^\circ\text{C}$  durante 24 horas y pesada en balanza analítica.

Lavar una cápsula de porcelana de 10 a 12 cm de diámetro con agua destilada, llevar a estufa durante una hora y después a la mufla a  $550^\circ\text{C}$  durante 30 minutos.

Retirar y dejar enfriar totalmente. Pesarla obteniendo P1.

Pesar una porción de muestra de cada uno de los tipos de compost, obteniendo P2.

Llevar la cápsula de porcelana conteniendo la muestra a estufa a  $105^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

Retirar y dejar enfriar. Pesar obteniendo P3.

De esta manera:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(P2-P3) * 100}{(P2-P1)}$$

#### 4.5.3 Materia orgánica total

Del material seco resultante en la medición de humedad se utilizaron las muestras para la determinación de la materia orgánica.

Ésta se determinó por el método de combustión a 550°C durante una hora y media en una mufla.

Llevar la cápsula de porcelana con el material del análisis de la humedad a la mufla, manteniendo la puerta entreabierta para proporcionar aireación. La muestra debe ser calentada lentamente, ya que puede ocurrir pérdida de material si la temperatura se aumenta rápidamente.

Luego de cerrar la puerta y de alcanzada la temperatura de 550°C, mantener en esta temperatura por una hora y media.

Retirar la cápsula, dejar enfriar y pesar, obteniendo P4.

Por lo tanto:

$$MO_{TOTAL} (\%) = \frac{(P3-P4) * 100}{(P3-P1)}$$

#### 4.5.4 Residuo mineral total

El residuo mineral que permanece en la cápsula se conoce como cenizas totales, material no volátil o residuo mineral total: es el residuo inorgánico que permanece luego de la quema de la materia orgánica, que es transformada en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>. Las cenizas están constituidas principalmente por grandes cantidades de K, Na, Ca e Mg y pequeñas cantidades de Al, Fe, Cu, Mn y Zn

La determinación es mediante un simple cálculo a partir de los datos del análisis de la materia orgánica total. Entonces:

$$RM_{TOTAL} (\%) = \frac{(P4 - P1) * 100}{(P3 - P1)}$$

#### 4.5.5 Carbono orgánico

Según KIEHL (1985), el porcentaje de carbono orgánico tiene un factor conversión entre 1,724 y 1,923 correspondiente al 52% y 58% respectivamente, de carbono contenido en la materia orgánica degradada.

Por lo tanto:

$$CO (\%) = \frac{MO_{TOTAL} (\%)}{1,8}$$

#### 4.5.6 Relación C/N

La determinación de la relación C/N es un parámetro que se obtiene dividiendo el porcentaje de carbono orgánico por el porcentaje de nitrógeno obtenido a partir del método Kjeldahl (desarrollado en 4.5.7).

De esta manera:

$$C/N = CO (\%) / N (\%)$$

#### 4.5.7 Macronutrientes

Para la determinación del tenor de nitrógeno fue utilizado el Método Kjeldahl:

Preparación de la muestra: La muestra se seca en un horno durante 12 horas a 105-110°C, molida nuevamente y colocada hasta peso constante en horno. Se deja enfriar.

Preparación de la solución de digestión: Añadir 100 partes de  $K_2SO_4$  en 1 parte de  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  y 0,8 partes de  $Se_8$ .

Preparación de la solución indicadora de ácido bórico: Para 1000 ml de  $H_3BO_3$  de 4%, agregar 15 ml de rojo de metilo (0,1% en alcohol) y 6 ml de verde de bromocresol (0,1% en alcohol).

Solución de NaOH-50%: Adicionar 500 gr de NaOH en 1000 ml de agua destilada.

Digestión: Pesar 0,5 gr de muestra e introducir en un tubo Kjeldahl. Añadir de 1 a 2 gr de la solución de digestión y 12 ml de  $H_2SO_4$  concentrado. Colocar los tubos en el digestor y calentarlos con moderación al principio, teniendo la precaución de usar protecciones, debido a los vapores ácidos que se desprenden. Continuar la digestión hasta que la solución se vuelve incolora y la temperatura alcance los 350°C. A continuación, calentar los tubos durante 30 minutos más. Dejar enfriar.

Destilación: Añadir a cada tubo 10 ml de agua destilada y colocarlos en el destilador. Agregar 40 ml de la solución de NaOH - 50% al conjunto de destilación moderadamente. Colocar un Erlenmeyer de 250 ml con 25 ml de la solución indicadora de ácido bórico en la punta del condensador para recibir el  $NH_3$ . Después de la adición de NaOH iniciar la destilación. La punta del condensador debe ser introducida en la solución para evitar la pérdida de amoníaco. Colectar un volumen del destilado de 2 a 3 veces mayor que el volumen inicial.

Titulación: Titular con una solución de  $H_2SO_4$  de normalidad estandarizada. Para obtener el porcentaje de nitrógeno en la muestra se utiliza:

$$N (\%) = V \cdot N \cdot 14 \cdot 100 / P_M$$

Donde,

V: volumen de ácido titulado (ml),

N: normalidad del ácido,

$P_M$ : peso de la muestra (mg)

Por otro lado, fósforo y potasio fueron determinados con la metodología propuesta por MALAVOLTA *et al.*, 1997:

Preparación de la muestra: La muestra se seca en horno a 105-110°C durante 12 horas, molida nuevamente y colocada hasta peso constante en horno. Se deja enfriar.

Preparación de la mezcla para extracción: Preparar una solución de proporción 2:1 (v/v)  $HNO_3$  y HCl.

Extracción por digestión ácida caliente (nitríco-clorhídrica): Pasar una cantidad de material seco y molido para un tubo de digestión. Anotar la masa de la muestra. Añadir 10 ml de la mezcla para extracción. Llevar al bloque digestor y aumentar gradualmente la temperatura hasta alcanzar los 160°C. Dejar a esta temperatura hasta que el volumen se reduzca a la mitad. Aumentar la temperatura a 210°C y dejar a esta temperatura hasta que el extracto no presente sin sólidos. Si es necesario, añadir un poco más de mezcla para extracción (misma proporción inicial). Para terminar la digestión, dejar reducir el volumen hasta 1 ml. Enfriar y transferir el extracto a un matraz aforado de 50 ml. Enrazar con agua destilada.

Preparación de la solución acuosa de molibdato de amonio al 5%,  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ : En un vaso de precipitados de 1000 ml colocar aproximadamente 400 ml de agua destilada caliente. Luego añadir poco a poco y agitando hasta que se disuelva 25 gr de molibdato de amonio. Esperar que se enfríe y pasar a un matraz aforado de 500 ml, lavando el vaso de precipitados inicial con agua destilada fría hasta completar el volumen del matraz y luego homogeneizar. Guardar este reactivo en frasco color ámbar.

Preparación de la solución de metavanadato de amonio 0,25%,  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ : En un vaso de precipitados de 1000 ml colocar aproximadamente 200 ml de agua destilada caliente. A continuación, agregar de a poco y agitando hasta su disolución 1,25 gr de  $\text{NH}_4\text{VO}_3$ . Añadir 175 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado y dejar enfriar. Pasar a un matraz aforado de 500 ml, lavando el vaso de precipitados inicial con agua destilada fría hasta completar el volumen del matraz y luego homogeneizar. Guardar este reactivo en frasco color ámbar.

Preparación del reactivo mezclado: Mezclar partes iguales de molibdato de amonio al 5% con metavanadato de amonio al 0,25%. Homogeneizar y almacenar en el refrigerador por una semana. Preferentemente, mezclar un poco el reactivo antes de usarlo.

Preparación de solución madre de fósforo (80 ppm de P): En un matraz aforado de 1000 ml conteniendo aproximadamente 300 ml de agua destilada y 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10N (280 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado/1), adicionar 0,3509 gr de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (fosfato monobásico de potasio). Secar en horno durante 2 horas a 70-80°C y luego dejar enfriar. Agitar y completar el volumen del matraz con agua destilada.

Preparación de la solución estándar de fósforo: En un matraz aforado de 100 ml usando una bureta añadir 0, 5, 10, 15, 20 y 25 ml de solución madre de P (80 ppm), 4 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10N. Completar el volumen del matraz con agua destilada y mezclar. Estas soluciones contienen respectivamente 0, 4, 8, 12, 16 y 20 ppm de P.

Preparación de la curva estándar: Pipetear 5 ml de las soluciones estándar a un tubo. Añadir 2 ml del reactivo mezclado y homogeneizar. Dejar en reposo durante 5 minutos y leer la absorbencia con una longitud de onda de 420 nm, siendo que esta lectura se puede tomar hasta 30 horas después de la adición del reactivo de color. Poner en los ejes de coordenadas, las concentraciones de fósforo en abscisas (0, 20, 40, 60, 80 y 100  $\mu\text{g P}/5 \text{ ml}$ ) y las lecturas obtenidas en las ordenadas ( $A = \text{absorbencia}$ ).

Análisis de fósforo en el extracto de digestión ácida: Pipetear 0,4 ml del extracto nítrico-clorhídrico en un tubo. Añadir 2 ml de agua destilada, 2 ml del reactivo de color y mezclar. Dejar en reposo por 5 minutos y leer la absorbencia a 420 nm. Para los cálculos, por la cantidad de materia seca (MS) utilizado, suponiendo haber utilizado 1 ml del extracto de ácido nítrico perclórico (0,5 gr MS/50 ml).

$$\begin{array}{ll} 0,5 \text{ gr MS} \longrightarrow 50 \text{ ml} & 0,01 \text{ gr MS} \longrightarrow C (\mu\text{g P}/5 \text{ ml}) \\ X \text{ gr MS} \longrightarrow 1 \text{ ml} & 100 \text{ gr MS} \longrightarrow \% \text{ P} \\ X = 0,01 \text{ gr MS} & \% \text{ P} = 0,01 * C \end{array}$$

Donde C es la concentración de fósforo en el extracto ( $\mu\text{g P}/5 \text{ ml}$ ) determinado a través de la curva estándar.

#### 4.5.8 Granulometría

El compost puede ser clasificado de acuerdo con su granulometría, pudiendo ser considerado como arenoso grueso, arenoso fino, microgranulado, polvo entre otros.

El procedimiento realizado para la clasificación del compost producido consistió en el uso de un agitador mecánico y un conjunto de dos tamices: ABNT N°18 con una abertura de malla de 1 mm y ABNT N°35 con abertura de malla de 0,5 mm.

En primera medida, se pesó la fracción de la muestra y ésta fue transferida para el conjunto de tamices, encajados uno sobre el otro, en orden decreciente del diámetro del tamiz. Luego, se agitó con el agitador durante 5 minutos con una frecuencia de 5,0 Hz.

Finalmente, fue necesario pesar cada tamiz y la fracción retenida en los mismos, estimándose de esta manera el porcentaje pasante, según las expresiones a seguir:

$$\% \text{ de muestra pasante en el primer o \acute{u}nico tamiz} = \frac{100 - R1}{G} * 100$$

$$\% \text{ de muestra pasante en el segundo tamiz} = \frac{100 - (R1+R2)}{G} * 100$$

$$\% \text{ de muestra pasante en el fondo} = \frac{100 - (R1+R2+R3)}{G} * 100$$

Donde:

G: masa (gr) de la muestra analizada

R1: masa (gr) de la fracción retenida en el 1° o \acute{u}nico tamiz

R2: masa (gr) de la fracción retenida en el 2° tamiz

R3: masa (gr) de la fracción retenida en el fondo

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Análisis visual de los compuestos

Al finalizar el proceso de compostaje, fue observada una gran reducción del volumen de las hileras y de los abonos producidos en los reactores. Esta disminución pudo ser mejor observada en las hileras, ya que éstas estaban más expuestas a las condiciones ambientales como puede observarse en las fotos 13 y 14.



Foto 13: Hileras del compostaje convencional al comenzar el proceso de compostaje. De derecha a izquierda: hilera 1 con 70% RP y 30% RC; hilera 2 con 50% RP y 50% RC; hilera 3 con 30% RP y 70% RC.  
FUENTE: Elaboración propia.



Foto 14: Hileras convencionales pasados 90 días del proceso de compostaje. De derecha a izquierda: hilera 1 con 70% RP y 30% RC; hilera 2 con 50% RP y 50% RC; hilera 3 con 30% RP y 70% RC.  
FUENTE: Elaboración propia.

## 5.2 Análisis químico de los compuestos

### 5.2.1 Compostaje convencional (manual)

Los resultados obtenidos en la caracterización de los diferentes compuestos producidos en las hileras, están representados en la tabla 2.

Tabla 2: Caracterización química de los compuestos producidos en hileras convencionales

PARÁMETROS	30% RP + 70% RC	50% RP + 50% RC	70% RP + 30% RC
Humedad (%)	32,6	30,48	32,60
Materia Orgánica (%)	76,72	75,82	81,47
Residuo Mineral (%)	23,28	24,17	18,52
Carbono Orgánico (%)	42,62	42,12	45,26
N (%)	1,97	1,82	1,79
Relación C/N	21,63	23,14	25,28
P (%)	0,184	0,196	0,181
K (%)	2,01	2,81	2,22
pH	7,42	7,35	7,45

Analizando los valores, es posible observar que el porcentaje de la humedad de todos los compuestos está dentro de los padrones estipulados por la bibliografía, que sugiere el valor máximo de la humedad del 40% para este tipo de compuesto (IRAM 29556-1, 2011).

Silva *et al.*, 2002 clasifica la cantidad de residuo mineral siendo como óptimo (menor 20%), bueno (20-40%), indeseable (mayor 40%). Los anteriores valores muestran que las hileras constituidas de 30% RP + 70% RC y las de 50% RP y 50% RC, obtuvieron valores considerados buenos. Se destaca el hecho de que el abono producido en la condición de 70% RP + 30% RC presentó valor de residuo mineral dentro de lo planteado como ideal (18,52%). Por otro lado, ningún tratamiento presentó valores indeseables.

El equilibrio de la relación C/N es de fundamental importancia en el compostaje, cuyo principal objetivo es crear condiciones para fijar los nutrientes para que puedan ser posteriormente liberados por medio del compuesto. La bibliografía sugiere un valor de relación C/N menor que 20 como condición de estabilidad (IRAM 29556-1, 2011). El resultado obtenido demostró que el valor de la relación C/N para las hileras constituidas de 30% RP + 70% RC, de 50% RP + 50% RC y de 70% RP + 30% RC presentan valores superiores al ideal (21,63; 23,14 y 25,28 respectivamente). Como los valores están arriba de lo que sugiere la bibliografía, se puede decir que el residuo no alcanzó la franja ideal de estabilización.

De acuerdo con la bibliografía el nitrógeno debe poseer valor mínimo de 0,5%. De este modo, todos los compuestos producidos presentan valores adecuados, ya que todos fueron superiores al mínimo establecido.

Los valores de fósforo presentan valores muy próximos entre sí. Se sabe que el mismo es necesario para las bacterias, siendo que un valor alto no genera consecuencias drásticas, mientras que su ausencia

inhibe el proceso. Los porcentajes obtenidos en el abono final fueron alrededor del 0,2%, para el cual la bibliografía sugiere valores entre 0,15% a 1,5% como condición de estabilidad del compost (IRAM 29556-1, 2011).

Los valores de pH de todos los casos pueden ser considerados ideales según la bibliografía, donde el valor de referencia para el pH es entre 6 y 8 como condición de estabilidad.

Los valores de Carbono orgánico del mismo modo son considerados buenos de acuerdo con la bibliografía, donde se estipula un valor mínimo de 15%.

### 5.2.2 Compostaje mecánico (reactor)

La tabla 3 presenta las características químicas de los compuestos producidos en el proceso mecánico con inyección de aire comprimido.

Tabla 3: Caracterización química de los compuestos producidos en reactor

<b>PARÁMETROS</b>	<b>30% RP + 70% RC</b>	<b>50% RP + 50% RC</b>	<b>70% RP + 30% RC</b>
<b>Humedad (%)</b>	48,29	50,48	60,53
<b>Materia Orgánica (%)</b>	75,13	64,96	60,19
<b>Residuo Mineral (%)</b>	24,87	35,04	39,81
<b>Carbono Orgánico (%)</b>	41,74	36,09	33,44
<b>N (%)</b>	2,16	2,14	2,03
<b>Relación C/N</b>	19,32	16,86	16,47
<b>P (%)</b>	0,283	0,223	0,229
<b>K (%)</b>	3,47	3,15	2,53
<b>pH</b>	7,03	7,16	7,43

Los abonos producidos con el proceso mecánico presentan valores de humedad considerados no satisfactorios para los compuestos con 30% RP + 70% RC, 50% RP + 50% RC y 70% RP + 30% RC ya que están por encima de lo estipulado como bueno según la bibliografía que indica una humedad menor del 40% como condición de estabilidad del compost (IRAM 29556-1, 2011). Esto puede ser fácilmente corregido al exponer el compuesto al sol durante un corto periodo de tiempo.

Los resultados de residuo mineral mostraron que el abono producido con 30% RP + 70% RC obtuvo valor considerado bueno, tendiendo a óptimo (24,87%) y muy cercano al resultado del compuesto producido manualmente con la misma proporción de residuos. Por otro lado, la proporción de 50% RP + 50% RC obtuvo un valor de residuo mineral considerado bueno (35,04%) y el tratamiento de 70% RP + 30% RC un valor cercano a lo indeseable (39,81%).

Los resultados obtenidos demostraron que el valor de la relación C/N en los reactores constituidos de 30% RP + 70% RC, de 50% RP + 50% RC y de 70% RP + 30% RC, presentan valores dentro del ideal (19,32; 16,86 y 16,47 respectivamente), ya que la bibliografía sugiere valores de relación C/N menores que 20 y próximos a 15 como ideales para una condición de estabilidad (IRAM 29556-1, 2011).

Los valores de nitrógeno obtenidos apuntan también a una concentración dentro de los valores adecuados, pues se encuentran por encima del mínimo.

Los tenores de fósforo presentan valores que variaron entre 0,22% a 0,28%, siendo importantes para el crecimiento microbiano.

Los valores de pH pueden ser considerados ideales.

Los valores de carbono orgánico también pueden ser considerados buenos de acuerdo con la bibliografía, donde se estipula el valor mínimo de 15%.

### 5.3 Análisis granulométrico de los compuestos

La granulometría del compost está muy relacionada con el aspecto y la facilidad de manejo y puede condicionar su uso. Este parámetro es particularmente importante cuando el destino del material vaya a ser el de sustrato. En ciertos casos una granulometría muy fina, puede ocasionar problemas en la utilización (exceso de polvo).

El análisis granulométrico de los seis compuestos producidos se encuentra en la tabla 4.

Tabla 4: Distribución granulométrica de los compuestos producidos en hileras convencionales (manual) y en reactor (mecánico)

COMPUESTO		Tamices	Masa retenida (gr)	Proporción (%)
M A N U A L	30% RP + 70% RC	ABNT n° 18	100,2	73,1
		ABNT n° 35	17,6	12,8
		Fondo	19,2	14,1
		<b>Total</b>	<b>137</b>	<b>100</b>
	50% RP + 50% RC	ABNT n° 18	33,4	55,5
		ABNT n° 35	10,4	17,3
		Fondo	16,4	27,2
		<b>Total</b>	<b>60,2</b>	<b>100</b>
	70% RP + 30% RC	ABNT n° 18	8,2	40,2
		ABNT n° 35	3	14,7
		Fondo	9,2	45,1
		<b>Total</b>	<b>20,4</b>	<b>100</b>
R E A C T O R	30% RP + 70% RC	ABNT n° 18	109,6	72,5
		ABNT n° 35	14,4	9,5
		Fondo	27,2	18
		<b>Total</b>	<b>151,2</b>	<b>100</b>
	50% RP + 50% RC	ABNT n° 18	81,8	72,9
		ABNT n° 35	18	16,05
		Fondo	12,4	11,05
		<b>Total</b>	<b>112,2</b>	<b>100</b>

<b>70% RP + 30% RC</b>	ABNT n° 18	24,8	59,62
	ABNT n° 35	8,2	19,71
	Fondo	8,6	20,67
	<b>Total</b>	<b>41,6</b>	<b>100</b>

Interpretación de resultados:

Textura gruesa: Partículas > 1 mm (poros grandes > 100 µm). Retienen cantidades reducidas de agua y están bien aireados.

Textura media: Distribución de partículas entre 0,2 mm y 1 mm (poros entre 20 µm y 100 µm). Retienen suficiente agua fácilmente disponible y presenta además adecuado contenido en aire.

Textura fina: Partículas < 0,2 mm (poros < 20 µm). Gran cantidad de agua difícilmente disponible y mal aireados.

Considerando que los análisis fueron realizado con tamices ABNT N°18 (1 mm) y ABNT N°35 (0,5 mm), se puede decir que los resultados arriba demuestran que la clasificación de los compuestos producidos encuadra como textura media a textura gruesa.

#### 5.4 Análisis y comparación de los resultados según las metodologías

Gráfico 1: Caracterización química de los compuestos producidos en hileras (manual)

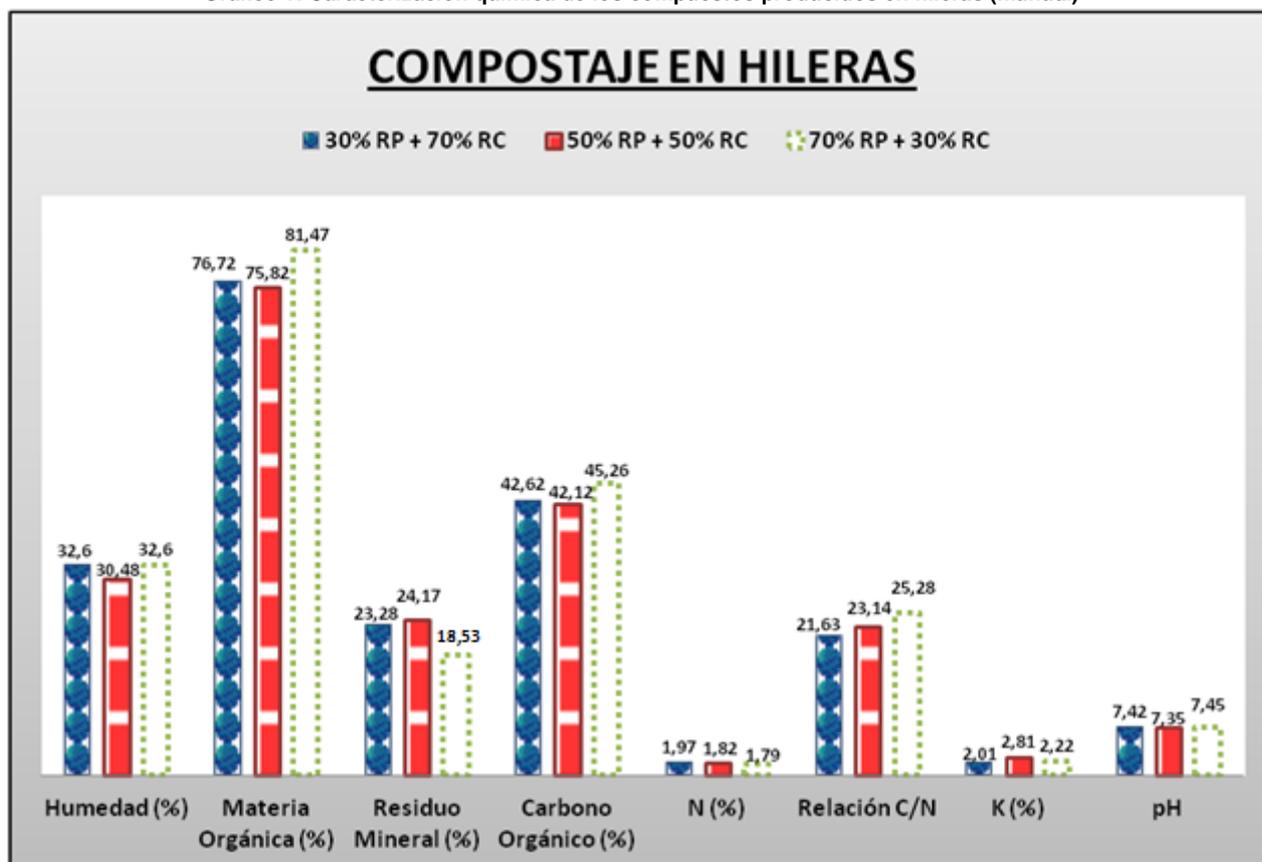
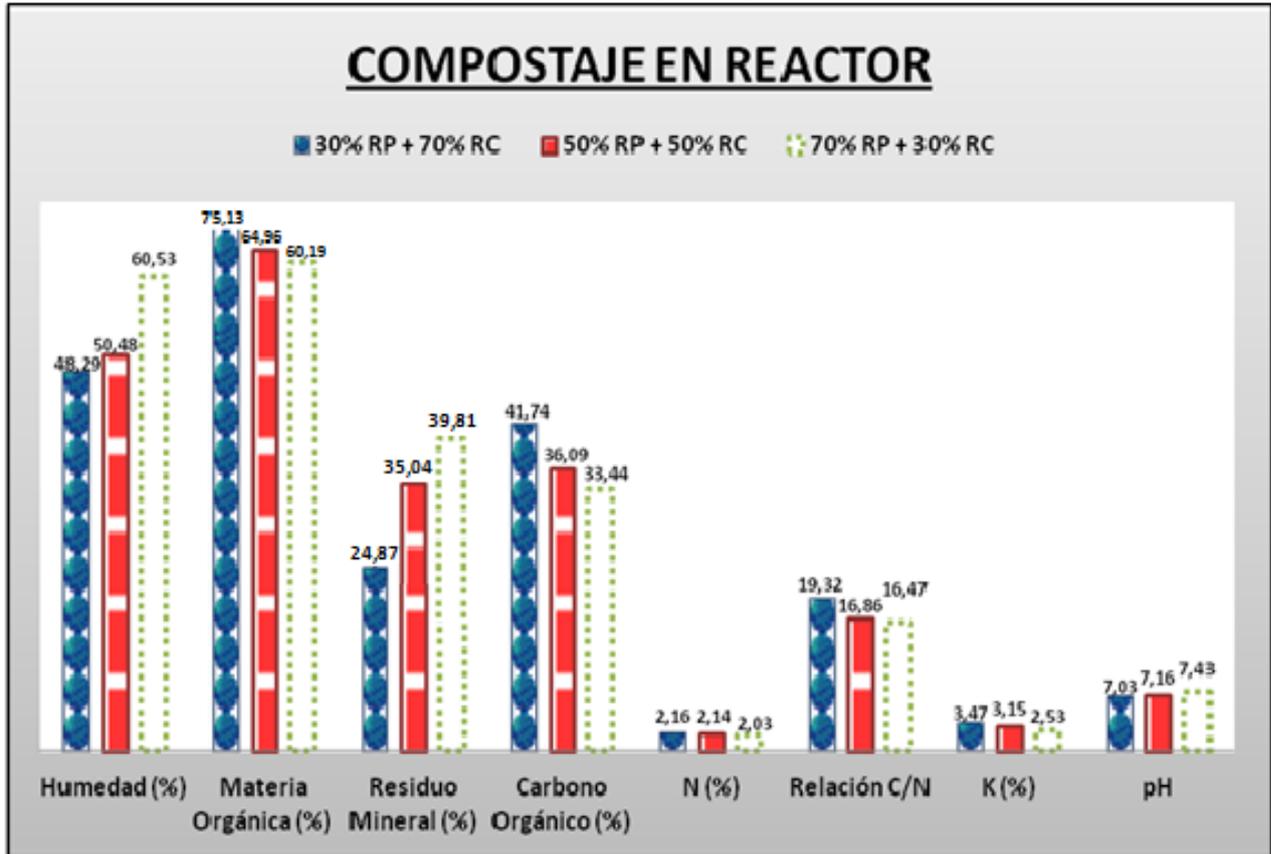


Gráfico 2: Caracterización química de los compuestos producidos en reactor (mecánico)



**HUMEDAD:** Existe una alta diferencia entre los distintos tratamientos respecto a este parámetro. Por un lado, el compostaje manual en hileras presentó un promedio de humedad de 31,9% y el compostaje en reactor 51,3%. Esto pudo deberse a que en el tratamiento manual, las hileras si bien fueron protegidas de las condiciones climáticas tales como las lluvias, no quedaban aisladas; por lo que la alta temperatura pudo haber disminuido la humedad de las pilas. El compostaje en reactor, presenta para todos sus tratamientos valores superiores al máximo de 40% que plantea IRAM 29556-1 como condición de estabilidad de un compost. Por otro lado, en el compostaje manual, los porcentajes de humedad de las distintas proporciones se encontraron más parejos que en el compostaje en reactor.

**MATERIA ORGÁNICA:** No hay diferencia significativa entre el compostaje manual, el que promedia un 78% de materia orgánica, con el compostaje en reactor el cual posee un promedio de 66,76%. Dentro del compostaje manual presentó mayor porcentaje de materia orgánica la proporción de 70% RP + 30% RC, en cambio en el compostaje en reactor, la que mostró mayor porcentaje fue la proporción de 30% RP + 70% RC.

**RESIDUO MINERAL:** El compostaje manual presenta un promedio de 21,99% y el compostaje en reactor 33,24%, si bien se percibe que existe una notable diferencia entre los promedios de ambos tipos de compostaje, podemos observar que en el compostaje manual, la proporción de 70% RP + 30% RC presentó valores ideales por debajo del 20% y las proporciones de 30% RP + 70% RC y 50% RP + 50% RC valores normales. Por otro lado, en el compostaje en reactor, las proporciones de 30% RP + 70% RC y

50% RP + 50% RC también presentaron valores normales (hasta 40%) y la proporción de 70% RP + 30% RC obtuvo valores rondando lo indeseable (39,81%).

**CARBONO ORGÁNICO:** Los valores están íntimamente relacionados y coinciden con lo detallado en el punto de materia orgánica ya que por fórmula, el porcentaje de carbono orgánico es directamente proporcional al porcentaje de materia orgánica total.

**NITRÓGENO:** Si bien los valores de este parámetro son bajos en ambos tipos de compostaje, el manual presenta un promedio de 1,86% y el compostaje en reactor un promedio de 2,11%, lo que nos determina que en el compostaje en reactor se obtuvieron valores de nitrógeno un 13% superiores a los obtenidos en el compostaje manual en promedio. También es posible observar que tanto en el compostaje manual como en el compostaje en reactor, presentó mayor porcentaje de nitrógeno la proporción de 30% RP + 70% RC, y menor porcentaje la proporción de 70% RP + 30% RC.

**RELACIÓN C/N:** El compostaje manual promedia un valor de 23,35 y la proporción de 70% RP + 30% RC presenta mayor relación C/N (25,28) y a continuación la proporción de 50% RP + 50% RC (23,14). Por otro lado, el compostaje en reactor con un promedio de relación C/N de 17,55, posee la proporción de 30% RP + 70% RC con mayor valor (75,13) y luego la proporción de 50% RP + 50% RC (16,86). Como puede observarse, el compostaje en reactor presentó valores más cercanos a lo sugerido por IRAM 29556-1 como condición de estabilidad (menores a 20 y próximos a 15 como condición ideal). Esto se debe a que el contenido de nitrógeno obtenido en este tratamiento (compostaje en reactor) fue levemente superior al del compostaje manual, lo que permitió disminuir la relación C/N, ya que están inversamente relacionados.

**POTASIO:** Según los datos, el compostaje manual presenta un valor de potasio promedio de 2,35% y el compostaje en reactor un valor promedio de 3,05%, lo que nos permite definir que la cantidad de potasio obtenida en el compostaje en reactor es de casi un 30% más de lo obtenido en el compostaje manual.

**pH:** No existe diferencia entre los valores presentados por el compostaje manual y el compostaje en reactor. Ambos tratamientos dan como resultado un compost rondando la neutralidad: el compostaje manual en hileras presentó un pH promedio de 7,41 y el compostaje en reactor 7,21. En ambos tratamientos, obtuvo un pH levemente mayor la proporción de 70% RP + 30% RC.

## 6. CONCLUSIONES

Como fue detallado en el punto 4.2 Muestreo de los Residuos Orgánicos, se prescindió la realización de mediciones constantes de temperatura, humedad y del control de patógenos así como también del material inicial, a partir de las sugerencias de la Profesora Dra. María Cristina Rizk, para poder focalizar y hacer hincapié en las características físico-químicas de los compuestos orgánicos ya que eran el objetivo del trabajo.

Los compuestos orgánicos producidos en diferentes condiciones, ya sea en las hileras convencionales (compostaje manual) o en los reactores (compostaje mecánico), y con sus diferentes proporciones de residuos de poda y residuos de cantina, obtuvieron la mayoría de sus parámetros físicos y químicos, encuadrados dentro de los valores establecidos por la Norma IRAM 29556-1 de calidad ambiental y calidad del suelo (compostaje aeróbico) del Instituto argentino de normalización y certificación.

Puede ser indicado como tratamiento más adecuado el compostaje manual en hileras convencionales con una proporción de 30% RP + 70% RC, ya que fue éste el que obtuvo más parámetros con valores ideales y no presentó ningún parámetro con valores superiores o inferiores de lo que es considerado como compostaje estabilizado.

Es necesario realizar controles constantes de temperatura y humedad de las pilas y reactores para hacer un manejo del proceso, decidiendo con mayor fundamento la necesidad de riegos o volteos.

Realmente es factible compostar residuos de poda y de cantina de instituciones, a través de una metodología simple, obteniendo un compost con valores considerados como ideales, y de esta manera poder dar una solución a los residuos, disminuyendo su volumen y proporcionando un compost de alta calidad para el aporte de materia orgánica en suelos.

La producción de compost puede ser una solución aplicable en diferentes instituciones para los residuos orgánicos y de poda, con la previa elección según el presupuesto disponible y espacio entre la sencillez y economía del sistema en hileras en contraste con la mayor complejidad y costos que representa el compostaje mecánico en reactor.

## 7. GLOSARIO

**Actinomicetos:** grupo de bacterias Gram positivas. La mayoría se encuentran en la tierra, e incluyen algunas de las formas más típicas de vida terrestre, con un importante rol en la descomposición de materia orgánica. Estas bacterias renuevan las reservas de nutrientes en la tierra y son fundamentales en la formación de humus. La mayoría son aerobias. Algunos representantes de este grupo son: *Actinomyces*, *Arthrobacter*, *Frankia*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Streptomyces*.

**Aerobio:** proceso desarrollado en presencia de oxígeno. Sinónimo de aeróbico.

**Aerobiosis:** forma de vida de organismos que, para mantener la actividad metabólica, obtienen la energía a partir de procesos de oxidación en los que el oxígeno molecular interviene como oxidante final.

**Aminoácido:** compuesto químico orgánico en cuya composición molecular entran un grupo amino y otro carboxilo. Veinte de tales sustancias son los componentes fundamentales de las proteínas.

**Amoníaco:** gas incoloro y brillante, soluble en agua y alcohol, de fórmula química  $\text{NH}_3$ . Se forma por descomposición bacteriológica de proteínas, purines y urea. También se genera a causa de la combustión de combustibles fósiles.

**Anaerobio:** proceso desarrollado en ausencia de oxígeno. Sinónimo de anaeróbico.

**Anaerobiosis:** forma de vida de microorganismos anaerobios que para desarrollar la actividad metabólica, obtienen la energía a partir de procesos de oxidación en los que el receptor final de electrones es un compuesto orgánico.

**ATP:** Adenosín trifosfato. Nucleótido fundamental en la obtención de energía celular. Está formado por una base nitrogenada (adenina) unida al carbono 1 de un azúcar de tipo pentosa: la ribosa, que en su carbono 5 tiene enlazados 3 grupos fosfato. Se produce durante la fotorrespiración y la respiración celular, y es consumido por muchas enzimas en la catálisis de numerosos procesos químicos.

**Bacteria Gram negativa:** bacterias que no se tiñen de azul oscuro o violeta por la tinción de Gram, y lo hacen de un color rosado tenue. Esta característica está íntimamente ligada a la estructura didérmica dada por la envoltura nuclear, pues presenta doble membrana celular (una externa y la otra citoplasmática), lo que refleja un tipo natural de organización bacteriana. Presentan dos membranas lipídicas entre las que se localiza una fina pared celular de peptidoglicano. Al ser la pared celular fina, no retiene el colorante durante la tinción de Gram.

**Bacteria Gram positiva:** bacterias que se tiñen de azul oscuro o violeta por la tinción de Gram. Esta característica química está íntimamente ligada a la estructura de la envoltura celular que comprende la membrana citoplasmática y una pared celular compuesta por una gruesa capa de peptidoglicano, que

rodea a la anterior, confiere una gran resistencia y es la responsable de retener el tinte durante la tinción de Gram.

**Bacteria termófila:** bacteria que puede trabajar a altas temperaturas.

**Biodegradable:** sustancia química que puede transformarse en compuestos más sencillos por la acción biológica de bacterias y microorganismos.

**Biomasa:** conjunto de materia orgánica procedente de la actividad de los seres vivos acumulada en un ecosistema.

**Calor:** energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas entre dos sistemas.

**Celulosa:** polisacárido que forma parte de la pared celular de las células vegetales. La celulosa pura se obtiene eliminando toda incrustación de lignina, resina y otras materias orgánicas.

**Compost:** humus obtenido artificialmente por descomposición bioquímica aerobia o anaerobia de la fracción orgánica de los residuos.

**Compostaje:** proceso de reciclado completo de la materia orgánica biodegradable mediante el cual se la somete a fermentación controlada para obtener el compost.

**Compuestos orgánicos volátiles (COV):** sustancias químicas que contienen carbono y elementos como hidrógeno, oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Se convierten fácilmente en vapores o gases. Son liberados por la quema de combustibles como gasolina, madera, carbón o gas natural, así como también por disolventes y pinturas. Su importancia reside en la capacidad que tienen como precursores del ozono troposférico y su papel como destructores del ozono estratosférico. Contribuyen a la formación del smog fotoquímico al reaccionar con otros contaminantes atmosféricos y con la luz solar.

**Descomposición:** transformación de sustancias orgánicas complejas en otras más simples por medios químicos o biológicos.

**Dióxido de carbono:** gas incoloro e incombustible, componente habitual de la atmósfera, de fórmula química  $\text{CO}_2$ . Las plantas lo utilizan en la fotosíntesis como fuente de carbono. Se libera a la atmósfera como resultado de la combustión, respiración y fermentación.

**Esterilización:** proceso de destrucción de microorganismos o de organismos indeseables por medios químicos, físicos o biológicos.

**Exotérmico:** proceso que va acompañado de desprendimiento de calor.

**Fermentación:** proceso de descomposición lenta de las sustancias orgánicas producido por microorganismos o enzimas que no se modifican a lo largo de las reacciones. Suele ir acompañada de desprendimiento de calor y gases.

**Fermentación aerobia:** degradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno.

**Fermentación anaerobia:** degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno que da lugar al biogás.

**Materia orgánica:** sustancia cuyo componente constante es el carbono. Término empleado para designar los residuos de alimentos, restos de poda, jardinería. Es fácilmente fermentable y se utiliza para la fabricación de compost.

**Método Kjeldahl:** método analítico utilizado para determinar el nitrógeno total, basado en una oxidación o combustión húmeda. Consiste en convertir el nitrógeno orgánico presente en la muestra en nitrógeno amoniacal mediante una digestión con ácido sulfúrico. Para aumentar el punto de ebullición se utiliza sulfato de potasio o sulfato de sodio y para catalizar la oxidación de la materia orgánica se emplea mercurio, selenio o cobre. El nitrógeno amoniacal formado se libera durante una destilación mediante la adición de un álcali.

**pH:** índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Entre 0 y 7 la solución es ácida, y entre 7 y 14 es básica.

**Proteína:** compuesto orgánico complejo formado por cadenas de aminoácidos sintetizadas en el citoplasma celular.

**Residuo sólido urbano:** material de desecho que se genera en espacios urbanizados como consecuencia de actividades de consumo, domésticas, de servicios, etc.

**Sustrato:** todo material sólido, natural, de síntesis, mineral u orgánico, distinto del suelo "in situ", que colocado en un contenedor, puro o en forma de mezcla, permite el anclaje del sistema radicular del vegetal, desempeñando, por lo tanto, un papel de soporte y permitiendo su normal desarrollo.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, M.; PUCHADES, R.; 2002. Compostaje de residuos orgánicos generados en La Hoya de Buñol (Valencia) con fines hortícola. Valencia: Asociación para la Promoción Socioeconómica Interior Hoya de Buñol.

BIDLINGMAIER, W. 1996. Odour emissions from composting plants. *The science of composting*, 1, 71-79.

CAHYANI, V.; KAZUA, P.; MATSUYA, K.; ASAKAWA, S.; KIMURA, M.; 2004. Succession and phylogenetic profile of methanogenic archaeal communities during the composting process of rice straw estimated by PCR-DGGE analysis, *Soil Science and Plant Nutrition*, 50:4, 555-563.

CASTELLS, X. E., 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. (pp. 658-681). España: Díaz de Santos. Fundación Universitaria Iberoamericana

CROWE, M.; NOLAN, K.; COLLINS, C.; CARTY, G.; DONLON, B.; KRISTOFFERSEN, M.; 2002. Biodegradable municipal waste management in Europe. (pp. 31-33). Copenhagen: European Environment Agency.

EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY), 2002. Biodegradable waste management in Europe. EEA, Copenhaguen.

EKINCI, K.; KEENER, M.; ELLWEL, D.; MICHEL, JR.; 2004. Effects of aeration strategies on the composting process. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 48:3, 1203-1215.

ENGIRSU (Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos): <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=8235>

EPA (Environmental Protection Agency, USA), 2003. Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. EPA 625-R-92-013.

FALL, R. y COPLEY, S.; 2000. Bacterial sources and sinks of isoprene, a reactive atmospheric hydrocarbon. *Environmental microbiology*, 2:2, 123-130.

GONZALEZ, L., 2010. Residuos sólidos urbanos Argentina. Tratamiento y disposición final. Situación actual y alternativas futuras. Cámara argentina de la construcción. Área de pensamiento estratégico.

GOTAAS, H. B., 1956. Composting. Sanitary disposal and reclamation of organic wastes. World Health Organization.

GOYAL, S; DHULL, S; KAPOOR, K.; 2005. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity. *Bioresource Technology*, 96:14, 1584-1591.

HARUTA, S.; NAKAYAMA, T.; NAKAMURA, K; HEMMI, H.; ISHII, I; IGARASHI, I.; NISHINO, T.; 2005. Microbial diversity in biodegradation and reutilization processes garbage. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 99:1, 1-11.

HAUG, R. T., 1993. *The practical handbook of compost engineering*. Florida: CRC Press.

IRAM 29556-1, 2011. *Calidad ambiental - Calidad del suelo. Compostaje aeróbico. Parte 1: Conceptos básicos, factibilidad del tratamiento y buenas prácticas del proceso de compostaje de residuos verdes*. Instituto argentino de normalización y certificación.

JHORAR, B.; 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*, 5:4, 297-306.

KIEHL, F. J. 1985. *Fertilizantes orgánicos*. San Pablo: Agronômica Ceres Ltda.

LIANG, C.; DAS, K.; MC CLENDON, R.; 2003. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86:2, 131-137.

LYNCH, N. y CHERRY, R., 1996. Desing of passively aereated compost piles: vertical air velocities between pipes. *Biotechnology progress*, 12: 5, 624-629.

LYND, R.; WEIMER, P.; PRETORIUS, E.; 2002. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and molecular biology reviews*, 66:3, 506-577.

MICHEL, J.; PECCHIAN, S.; RIGOT, J.; KEENER, H.; 2004. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, Ohio Research and Development Center, 12:2, 323 – 334.

MISRA, R.; ROY, R.; 2003. *On-farm composting methods*. Food and agriculture organizations of the United Nations (FAO).

MORENO CASCO, J.; MORAL HERRERO, R.; 2008. *Compostaje*. (pp. 75-163). Madrid: Mundi-Prensa.

NOBLE, R y ROBERTS, J., 2003. Eradication of plant pathogens and nematodes during composting: a review. *The waste and Resources Action Programme*. (pp.548-568). Reino Unido: The old Academy.

RYCKEBOER, J.; MERGAERT, J.; VAES, K.; KLAMMER, S.; DE CLERCQ, D.; 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology*, 53:4, 349-410.

SANCHEZ MONEDERO, M.; ROIG, A.; PAREDES, C.; BERNAL, M.; 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the rutgers system and its effects on pH, C.E and maturity of the composting mixtures. *Bioresourse Technology*, 78:3, 301-308.

SULER, D.; FINSTEIN, M.; 1997. Effect of temperature, aeration, and moisture on CO<sub>2</sub> formation in bench-scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Environmental Microbiologic*, 33:2, 345-350.

TAN, K. H., 2000. *Environmental soil science*. New York: CRC Press.

UMWELTSCHUTZ NORD ARGENTINA SRL., 2004. Planta modelo de elaboración de compost. Paso de los Andes 362, Mendoza, Argentina.

VARELA, S., BASIL, G.; 2011. Uso de compost en la producción de plantines de especies forestales. Área Forestal - INTA EEA, Bariloche. "Silvicultura en vivero". Cuadernillo N° 4.

ZHANG, X.; CHENG, S.; ZHU, C.; SUN, S.; 2006. Microbial PAH-degradation in soil: degradative pathways and contributing factors. *Pedosphere*, 16:3, 555-565.

ZUCCONI, F.; BERTOLDI, M.; 1987. Specifications for solid waste compost. *Biocycle*, 28:1, 58-61.