



**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA
FACULTAD DE AGRONOMIA**

**COMPOSTAJE DE CORTEZA DE PINO.
CARACTERIZACION Y ALGUNOS ASPECTOS ECONOMICOS.**

por

DEPARTAMENTO DE
DOCENCIA Y
BIBLIOTECA
FACULTAD DE AGRONOMIA

**Gabriela DI CARLO VILLAR
Cecilia PENENGO SALISBURY**

FACULTAD DE AGRONOMIA

DEPARTAMENTO DE
DOCENCIA Y
BIBLIOTECA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título
de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2000

Tesis aprobada por:

Director: Lic. Gabriela MALVAREZ
Nombre completo y firma

Ing. Agr. Fernando IRISITY
Nombre completo y firma

Ing. Agr. Rafael ESCUDERO
Nombre completo y firma

Fecha: _____

Autores: Gabriela DI CARLO VILLAR
Nombre completo y firma

Cecilia PENENGO SALISBURY
Nombre completo y firma

AGRADECIMIENTOS

A la Lic. Gabriela Malvárez e Ing. Agr. Fernando Irisity, por la dirección, supervisión y apoyo en la realización de este trabajo.

Al Ing. Agr. Bruno Bianchi, por el aporte del predio y materiales utilizados en esta experiencia.

A la Sra. Celia Silveira de Terrile y al Sr. Alex Burwood, por su apoyo permanente en el manejo del ensayo.

A todos los integrantes del Departamento Forestal en general, por su buena disposición para brindarnos información siempre que fue solicitada.

Al personal del Departamento de Documentación y Biblioteca de la Facultad de Agronomía, por su colaboración y asesoramiento.

Finalmente queremos agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma prestaron su colaboración en la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACION.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IV
1. <u>INTRODUCCION</u>	9
2. <u>ANTECEDENTES</u>	11
2.1. LOS DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS.....	11
2.2. RESIDUOS FORESTALES Y SUS POSIBLES DESTINOS.....	11
2.2.1. <u>Residuos de monte</u>	11
2.2.2. <u>Residuos de la industria papelera</u>	12
2.2.3. <u>Residuos de aserraderos</u>	12
2.2.4. <u>Residuos forestales en Uruguay y sus destinos</u>	14
2.3. COMPOSTAJE DE RESIDUOS.....	15
2.3.1. <u>Concepto</u>	15
2.3.2. <u>Antecedentes históricos</u>	18
2.3.3. <u>Métodos de compostaje</u>	19
2.3.4. <u>Proceso de compostaje y parámetros involucrados</u>	21
2.3.4.1. <u>Materia prima</u>	23
2.3.4.2. <u>Dimensión de las pilas</u>	27
2.3.4.3. <u>Microorganismos</u>	28
2.3.4.4. <u>Otros nutrientes</u>	31
2.3.4.5. <u>Aereación</u>	32
2.3.4.6. <u>Humedad</u>	34
2.3.4.7. <u>Temperatura</u>	36
2.3.4.8. <u>pH</u>	38
2.3.5. <u>Compostaje de residuos forestales</u>	38

2.3.6. <u>Duración del proceso</u>	42
2.3.7. <u>Determinación de la madurez del compost</u>	43
2.3.8. <u>Producto del compostaje y sus posibles usos</u>	46
2.3.9. <u>Experiencias de compostaje de residuos forestales en Uruguay</u>	48
2.4. <u>SUSTRATOS PARA VIVEROS FORESTALES</u>	51
2.4.1. <u>Tipos de sustratos</u>	54
2.4.2. <u>Sustratos utilizados en viveros forestales en Uruguay</u>	54
3. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	56
3.1. <u>INSTALACION DEL ENSAYO</u>	56
3.1.1. <u>Localización</u>	56
3.1.2. <u>Sustrato</u>	56
3.1.3. <u>Tratamientos</u>	56
3.1.4. <u>Instalación de las pilas</u>	57
3.2. <u>SEGUIMIENTO DEL ENSAYO</u>	57
3.2.1. <u>Relación C/N de los tratamientos</u>	57
3.2.2. <u>pH de los tratamientos</u>	58
3.2.3. <u>Temperatura de las pilas</u>	58
3.2.4. <u>Humedad de las pilas</u>	58
3.2.5. <u>Aereación de las pilas</u>	58
3.2.6. <u>Tests de germinación</u>	59
3.2.7. <u>Determinación granulométrica</u>	60
3.2.8. <u>Evaluación agronómica</u>	60
3.2.9. <u>Análisis de retención de agua</u>	61
3.2.10. <u>Evaluación de costos</u>	62
3.2.11. <u>Otros datos considerados en el estudio</u>	62
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u>	63
4.1. <u>INSTALACION DE LAS PILAS</u>	63

4.2. DIMENSION DE LOS CHIPS DE CORTEZA DE PINO.....	64
4.3. DIMENSION DE LAS PILAS.....	68
4.4. FUENTE DE NITROGENO E INOCULO UTILIZADA.....	71
4.5. RELACION C/N DE LOS TRATAMIENTOS.....	72
4.6. pH DE LOS TRATAMIENTOS.....	74
4.7. TEMPERATURA.....	75
4.8. HUMEDAD.....	78
4.9. AERACION.....	80
4.10. TESTS DE GERMINACION.....	80
4.11. EVALUACION AGRONOMICA.....	82
4.12. RETENCION DE AGUA.....	84
4.13. EVALUACION DE COSTOS.....	85
4.14. CONSIDERACIONES FINALES.....	92
5. <u>CONCLUSIONES</u>	94
6. <u>RESUMEN</u>	95
7. <u>SUMMARY</u>	96
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	97
9. <u>ANEXOS</u>	100
ANEXO N° 1.....	100
ANEXO N° 2.....	101
ANEXO N° 3.....	104
ANEXO N° 4.....	110
ANEXO N° 5.....	112
ANEXO N° 6.....	115

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro N°		Página
1	Coeficiente de aserrío y porcentaje de producción de residuos de diferentes aserraderos, clasificados por su nivel de producción.....	14
2	Relación C/N de diferentes materiales.....	25
3	Grupos de microorganismos predominantes durante el proceso de compostaje en función de la temperatura.....	29
4	Niveles de humedad óptimos de diferentes sustratos.....	35
5	Parámetros óptimos del proceso de compostaje.....	39
6	Composición química de compost maduros.....	47
7	Influencia de la dimensión de partícula en la porosidad y retención de agua.....	53
8	Variación de las diferentes fracciones granulométricas de los tres tratamientos.....	65
9	Relación C/N inicial de los tratamientos.....	72
10	Relación C/N final de los tratamientos.....	73
11	pH inicial de los tratamientos.....	74
12	pH final de los tratamientos.....	75
13	Porcentaje de germinación de <i>Eucalyptus grandis</i> y <i>Lactuca sativa</i> a los 3, 5 y 7 meses de proceso.....	81
14	Celdas con semillas germinadas por bandeja a los 18 días de sembradas.....	83
15	Celdas con semillas germinadas por bandeja a los 27 días de sembradas.....	84

16	Capacidad de retención de agua de cada tratamiento y del testigo (Eucatex).....	84
Figura N°		Página
1	Esquema del proceso de compostaje.....	17
2	Elementos involucrados en el proceso de compostaje.....	18
3	Proceso de instalación de la pila del tratamiento 3.....	63
4	Pilas ya instaladas.....	63
5	Dimensión de partículas de corteza al inicio del proceso.....	64
6	Variación del porcentaje de partículas < 6.3 mm durante el proceso de compostaje.....	66
7	Dimensión de partículas a los 10 meses de proceso.....	67
8	Tamices utilizados para los ensayos granulométricos realizados.....	67
9	Tamaño de partícula de muestra tamizada.....	67
10	Dimensiones de las pilas a los 10 meses de proceso.....	69
11	Comparación de las temperaturas de los distintos tratamientos entre sí y con la temperatura media ambiente.....	77
12	Comparación de precipitaciones totales mensuales del ensayo vs. totales mensuales normales en el país.....	79
13	Porcentaje de germinación de <i>Eucalyptus grandis</i> durante el proceso de compostaje.....	81
14	Porcentaje de germinación de <i>Lactuca sativa</i> durante el proceso de compostaje.....	82
15	Capacidad de retención de agua de los diferentes sustratos.....	85

1. INTRODUCCION

En Uruguay así como en el resto del mundo, existe cada vez más preocupación por la elevada producción de residuos tanto orgánicos como inorgánicos, provenientes fundamentalmente de la actividad industrial, agrícola y agroindustrial.

Es por esta razón que permanentemente se está investigando en busca de nuevas formas de utilización de dichos residuos para disminuir las fuentes de contaminación ambiental existentes.

En el caso particular de los residuos forestales, grandes cantidades de desechos lignocelulósicos se producen anualmente en el mundo entero. Los residuos de bosques representan aproximadamente un 5% del volumen total de madera del monte; los residuos de la industria del papel un 6,5% del volumen de material consumido en el proceso y en el caso de los aserraderos aproximadamente la mitad de lo que se consume se transforma en residuo.

Existe a su vez, en relación a la forestación, alta necesidad de sustrato para la producción de plantines en vivero. El sustrato en un vivero forestal es uno de los principales insumos que ingresan al sistema para la producción de plantas. En Uruguay anualmente se consumen importantes cantidades de sustrato, ya sea comercial o elaborado por los propios viveros.

Uno de los destinos posibles de los residuos producidos por la industria de la madera es el compostaje. Este proceso de degradación aeróbica permite aprovechar dichos residuos para obtener un producto estable que pueda ser utilizado como alternativa de sustrato forestal.

Es así que el compostaje, dada la alta producción de residuos por parte de la industria forestal y la importante necesidad de sustrato por parte de quienes se dedican a la producción de plantines, es una alternativa que colabora en la disminución de la proporción de residuos desaprovechados y en la obtención de un producto estable que puede emplearse como soporte para plantines en vivero.

En función de lo anteriormente mencionado, los objetivos del presente trabajo son:

a) Objetivo general:

Evaluar la alternativa de un vivero forestal de producir su propio sustrato.

b) Objetivos específicos:

- evaluar la posibilidad de utilización de un residuo forestal mediante el proceso de compostaje;
- estudiar diferentes combinaciones de materiales a compostar de acuerdo a su disponibilidad para el vivero;
- determinar el punto de maduración de cada combinación, considerando distintos parámetros;
- evaluar, desde el punto de vista de sus costos, el proyecto en estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1. LOS DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS

Muchas de las actividades desarrolladas en el sector forestal, ya sean de carácter silvícola o industrial, dejan como saldo una importante producción de residuos.

Es por esta razón que la necesidad de encontrar alternativas de aprovechamiento de los diferentes tipos de residuos se torna cada vez más importante.

2.2. RESIDUOS FORESTALES Y SUS POSIBLES DESTINOS

Grandes cantidades de desechos conteniendo lignocelulosa como madera y corteza se producen anualmente en el mundo. En muchos casos son un elemento significativo de contaminación para el medio ambiente. De cualquier forma también poseen valor potencial, con infinitas posibilidades como base para desarrollos biotecnológicos (Fermor, 1993).

Los procesos de bioconversión incluyen producción de gas por digestión anaeróbica, producción biológica de pulpa y utilización de madera, producción y uso industrial de celulasas y producción de ración animal a partir de desechos lignocelulósicos (Fermor, 1993). Pueden ser utilizados también tratamientos biológicos (compostaje) para reducir el volumen de los desechos forestales, creando un material más estable para aplicaciones hortícolas y agrícolas (Campbell et al., 1991). Una eliminación de residuos organizada, el compostaje y los esquemas de bioconversión para desechos lignocelulósicos está a evaluación a nivel mundial (Fermor, 1993).

2.2.1. Residuos de monte

Dentro de los residuos de monte se pueden encontrar rameros, despuntes y corteza (si se descortezan en el monte). El porcentaje de estos residuos (excepto corteza) es del 5,5% del volumen total de madera del monte para *Eucalyptus* y de 4% para *Pinus*. Estos desechos pueden ser aún mayores cuando el objetivo es sólo el aserrado (Riegelhaupt, 1989 cit. por Curbelo et al., 1996).

Los posibles destinos de dichos residuos son: chipeado y venta, chipeado y esparcido en el monte, quema de los residuos dentro o fuera del monte y el apilado en fajas largas o su esparcimiento en el área (Daniluk, G., 1993 cit. por Curbelo et al., 1996).

2.2.2. Residuos de la industria papelera

Las cáscaras de árboles, producidas como residuo de la industria del papel, representan una proporción correspondiente al 6,5% del volumen de material consumido en el proceso de producción de pasta celulósica.

Parte de ellas han sido utilizadas como combustible en las calderas de las propias unidades industriales, dando como resultado una gran acumulación de cenizas que podrían aplicarse como fertilizantes de suelo o en mezcla con compost orgánico en pequeñas dosis. Otra porción de la corteza es acumulada y representa un grave problema debido a aspectos estéticos y a los altos riesgos de incendio que significa (Weber et al., 1987).

Como forma racional de utilización de las cortezas ha sido indicada, por Hoitink y Poole, 1980 cit. por Weber et al. (1987), la biodegradación para la producción de compostaje orgánico y posterior aprovechamiento agrícola, como fertilizante y acondicionador de suelos.

2.2.3. Residuos de aserraderos

Tuset y Durán (1980) presentan una lista de residuos que corrientemente aparecen en el proceso de aserrado de rollos. Estos son: corteza; descartes por tronzado de rollos; costaneros; médula y leño circundante; cantos redondeados; despuntes; descartes por clasificación de piezas escuadradas; corrección del espesor; aserrín y virutas del cepillado.

Estos residuos pueden significar el 60 o 65% del volumen de madera que ingresa a un aserradero en forma de rollos con corteza.

Por cada metro cúbico de madera rolliza en el aserradero se produce un promedio de 393,3 kg de chips con un contenido de humedad de 77%, 74,3 kg de corteza con un contenido de humedad de 92% y 20,6 kg de aserrín con un contenido de humedad de 65% (Frisque, 1979 cit. por Curbelo et al., 1996).



Para solucionar el problema que ese alto porcentaje de residuos significa, Tuset y Durán (1980), plantean tres alternativas:

- a) Reducir el volumen de madera que queda como residuo.
- b) Sistemas de movilización y eliminación de los residuos.
- c) Utilización económica de los residuos.

Esta utilización económica de los residuos determina darle a los mismos diferentes destinos y usos alternativos. Como ejemplos se citan algunos residuos y sus posibles destinos.

- **Aserrín:** briquetas para comustible, piso para establos y locales de crianza avícola, cobertura de suelos en bordes o centro de obras viales, material de limpieza de curtidurías, el aserrín de coníferas está siendo utilizado en la elaboración de pulpas para papel, como integrante de harina de madera se aplica en la fabricación de moldeados fenólicos y en linóleo y en la perforación de pozos petrolíferos (Tuset y Durán, 1980).
- **Corteza:** aprovechamiento de los extractivos que la integran como taninos, ceras, aceites esenciales y fenoles complejos (Tuset y Durán, 1980). Otro posible uso de la corteza es como soporte para el crecimiento de plantas luego de su compostaje (Van Schoor et al., 1988). La corteza triturada ha sido durante muchos años utilizada por jardineros y viveristas como un mülch para flores y jardines ornamentales, con el fin de proteger el suelo, mejorar la retención de agua y suprimir el crecimiento de malezas. Estos materiales están siendo actualmente compostados en forma comercial para la inclusión en mezclas de compost (Hoitink y Fahi, 1986 cit. por Fermor, 1993).
- **Costaneros:** leña como fuente de energía, enchapados y construcción (Mustin, 1987).
- Tanto el aserrín como los costaneros, despuntes y cantos redondeados pueden ser transformados en partículas (Tuset y Durán, 1980). Cuando estos residuos se transforman en astillas, el aprovechamiento de la madera se mejora en un 25 a 30% (Tuset y Durán, 1980; FAO, 1982 a cit. por Curbelo et al., 1996).

2.2.4. Residuos forestales en Uruguay y sus destinos

Según el Censo de Aserraderos realizado en el año 1996 por el PRAIF, en el país existían 300 aserraderos que eran los responsables de abastecer el 50 - 60% del consumo nacional de madera. Hoy día hay en actividad 209 aserraderos en el país, los que son clasificados según su nivel de producción en bajo, medio y alto. Se considera como bajo a aquellos que consumen entre 1 y 720 tt/año de madera; medio a los que consumen entre 721 y 2880 tt/año y alto a los que consumen más de 2880 tt/año de madera. El 60% de los aserraderos del país consumen 180 tt/mes y son considerados chicos; un 21% consumen entre 181 y 360 tt/mes y son considerados medianos; un 15% consumen entre 361 y 640 tt/mes y se consideran grandes y, por último, un 4% consumen entre 641 y 1900 tt/mes y son los aserraderos muy grandes (Daniluk et al., 2000).

En cuanto a la materia prima que procesan, el 60% es madera de *Eucalyptus*, 28% corresponde a madera de *Pinus* y 12% a madera de *Salicáceas*.

En relación al rendimiento de los aserraderos, se presenta un cuadro que contiene ejemplos de aserraderos representativos de cada nivel de producción (bajo, medio y alto), con su correspondiente coeficiente de aserrío y nivel de producción de residuos.

Cuadro Nº 1 - Coeficiente de aserrío y porcentaje de producción de residuos de diferentes aserraderos, clasificados por su nivel de producción

Aserradero	Especie utilizada	Nivel de Producción	Coeficiente de aserrío (%)	Producción de residuos (%)
Aserradero Sauce	<i>Eucalyptus grandis</i>	Bajo	56,3	43,7
Maderas Progreso	<i>Eucalyptus grandis</i>	Medio	43,4	56,6
Pocono S.A.	<i>Eucalyptus grandis</i>	Alto	44,1	55,9
Villa Colón	<i>Pinus taeda</i>	Bajo	38,3	61,7
Profun	<i>Pinus pinaster</i>	Medio	44,0	56,0
Caja Bancaria	<i>Pinus elliotti</i>	Alto	43,9	56,1

Fuente: Daniluk et al., 2000.

Los principales destinos de esos residuos, para el caso particular de los aserraderos considerados en el cuadro, son:

- Aserradero Sauce: los vende a una fábrica de cajones.
- Maderas Progreso: los quema.
- Villa Colón: vende los costaneros como leña.
- Profun: los vende como combustible a una empresa aceitera.

Los aserraderos chicos generalmente no descortezan y sus residuos son básicamente costaneros. Los aserraderos "Aral" y "Fymnsa" descortezan y venden las cáscaras (*¹).

Las alternativas de aprovechamiento de los residuos forestales, como pudo observarse, son variadas. Una de ellas es el compostaje, proceso de degradación aeróbica que permite obtener a partir de residuos un producto estable y utilizable para la producción de plantas.

2.3. COMPOSTAJE DE RESIDUOS

2.3.1. Concepto

A continuación se presentan una serie de definiciones de "compostaje" según diferentes autores:

- "La palabra compost ha sido utilizada para designar al fertilizante orgánico producido por el amontonamiento de restos vegetales y animales, ricos en sustancias nitrogenadas, mezclados con otros residuos vegetales pobres en nitrógeno y ricos en carbono. Esta mezcla tiene por finalidad ser sometida a un proceso fermentativo que haga que esas materias primas, por un proceso de descomposición microbiológica, pasen a un estado parcial o totalmente humificado. El compost es, por lo tanto, el resultado de un proceso controlado de descomposición bioquímica de materiales orgánicos, transformados en un producto más estable que puede ser utilizado como fertilizante. El compostaje es, entonces, una técnica ideada para obtener más rápido y en mejores condiciones materia orgánica estabilizada." (Kiehl, 1985).
- "Desde un punto de vista general, el compostaje será definido como el proceso biológico que asegura la transformación de los constituyentes orgánicos de desechos en un producto orgánico estable, higiénico, similar a la tierra y rico en compuestos húmicos: EL COMPOST (Mustin, 1987)".
- Crawford en 1983 (cit. por Van Schoor et al., 1988) define al compostaje como "la descomposición artificial de materia orgánica heterogénea debido a una mezcla de poblaciones microbianas en ambiente aeróbico, húmedo y caliente".

(*¹) Irisity. F., 2000. com. pers.

- R.T. Haug (1980) cit. por Mustin (1987) definió el compostaje como “la descomposición biológica y la estabilización de sustratos orgánicos bajo condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas termófilas, resultado de una producción de calor de origen biológico, con la obtención de un producto final suficientemente estable para su almacenamiento y utilización sobre el suelo sin impactos negativos para el medio ambiente. Para este autor, el compost es una técnica de estabilización y de tratamiento de los desechos orgánicos”.
- “Compostaje significa un proceso de degradación microbiano en el cual la materia orgánica es desintegrada y reestructurada por una población mezclada y compleja de microorganismos en un ambiente aeróbico mojado, tibio. Es un proceso muy antiguo tanto que fue practicado hace 4000 años por granjeros y jardineros chinos” (King, 1927; FAO, 1977 cit. por Guedes de Carvalho et al., 1990).
- “Es la descomposición o degradación de los materiales de desechos orgánicos por una población mixta de microorganismos en un ambiente cálido, húmedo y aireado. Los desechos se amontonan juntos en una pila de manera que el calor generado en el proceso pueda ser conservado. Como resultado, sube la temperatura de la pila, acelerando por tanto el proceso básico de degradación natural, que normalmente ocurre con lentitud en desechos orgánicos que caen sobre la superficie del suelo. El producto final del proceso es el compost o humus que sirve en agricultura para mejorar la estructura las propiedades de retención de agua del suelo y para suministrar nutrientes a las plantas a medida que el compost se descompone finalmente en materia mineral. Para obtener buenos resultados en la elaboración del compost y para su óptima utilización se requieren algunos conocimientos y experiencia práctica.” (Dalzell et al., 1991).
- “El compostaje es la transformación biológica de residuos orgánicos, bajo condiciones controladas, en un material relativamente bioestable que puede utilizarse como abono o fertilizante para las plantas” (Mathur, 1993).
- “El compostaje se define como un proceso exotérmico de oxidación biológica en el cual el material orgánico es descompuesto por una población mezclada de microorganismos en un ambiente tibio, húmedo y aeróbico” (Fermor, 1993).

- “El compostaje es un proceso controlado de descomposición bioquímica de materia orgánica para su transformación en productos más estables, que en su conjunto se denominan compost y pueden ser utilizados como abonos o mejoradores de suelo. El compost es el resultado de un proceso biológico dinámico que involucra una población muy variada de microorganismos. Prácticamente todos los residuos orgánicos pueden ser utilizados para hacer compost; el producto final y su calidad varían según la composición original del material, la naturaleza del proceso de compostaje y el estado de madurez del compost” (Díaz et al., 1998).

La siguiente figura muestra claramente cómo a través del proceso de compostaje se obtiene un producto estable y rico en humus a partir de desechos orgánicos.



Figura Nº 1 - Esquema del proceso de compostaje (Mustin, 1987).

En síntesis, el compostaje:

- es una técnica de estabilización y de tratamiento aerobio de los desechos orgánicos biodegradables;
- es el resultado de una actividad biológica compleja;
- es una técnica biológica de reciclaje de materia orgánica que al final de su evolución se transforma en humus, factor de estructura y fertilidad del suelo;
- es un modo de destrucción, por medio del calor y de diversos factores internos, de gérmenes y parásitos vectores de enfermedades y semillas de especies indeseables.

El compostaje es también una ecotecnología, ya que permite el regreso de la materia orgánica al suelo y su reinserción en los grandes ciclos ecológicos vitales de nuestro planeta. Solamente la materia orgánica proveniente de vegetales y animales puede producir humus mediante un proceso de compostaje (Mustin, 1987).

La figura N° 2 muestra en qué consiste el proceso de compostaje. Los microorganismos toman alimento del material orgánico, oxígeno del aire y agua. A su vez, emiten dióxido de carbono, agua y energía; se reproducen y finalmente mueren. Parte de la energía generada la usan para su crecimiento y movimiento, el resto es emitida en forma de calor. En general, el procedimiento se usa para transformar materiales de desecho orgánicos en un producto útil (Dalzell et al., 1991).

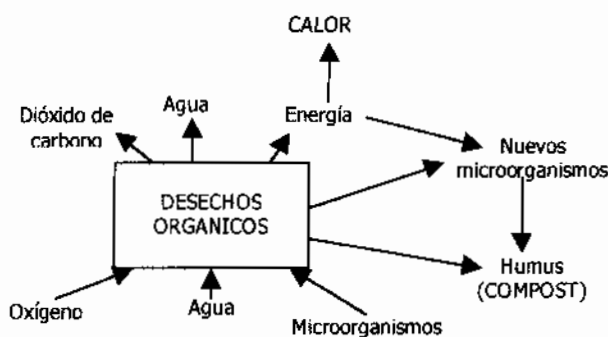


Figura N° 2 - Elementos involucrados en el proceso de compostaje (Dalzell et al., 1991).

2.3.2. Antecedentes históricos

Desde los más remotos tiempos, los agricultores utilizaban los restos orgánicos, tanto vegetales como animales, como un material para ser incorporado al suelo como intento de favorecer el desarrollo de las plantas y aumentar la producción agrícola (Kiehl, 1985).

En el siglo pasado era conocido en Europa un abono orgánico llamado '*nitreira*', que se preparaba amontonando los restos vegetales y animales y dejando que se descompusieran naturalmente. Como el nitrógeno orgánico por descomposición se transforma en amoniacal y finalmente en nitrato, se le dio al proceso el nombre de '*nitreira*' (Kiehl, 1985).

Un fitopatologista inglés, Sir Albert Howard, a principios de este siglo, desarrolló en la India una técnica para fabricar fertilizantes que se tornó mundialmente conocido como método Indore o método de Howard, siendo posteriormente adoptado por compañías de plantaciones, agricultores y horticultores de muchas partes del mundo (Kiehl, 1985 y Dalzell et al., 1991).

Durante el período comprendido entre 1926 y 1941, se realizaron numerosas investigaciones sobre el humus y el papel de los microorganismos implicados en su producción a partir de desechos orgánicos. Asimismo, otros estudios realizados por investigadores han demostrado la influencia en la descomposición de la materia orgánica de los siguientes factores: microorganismos, humedad, aireación y temperatura. Además de estos factores, también fue constatada la importancia del conocimiento de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), de la granulometría de la materia prima, del índice de pH y de los nutrientes minerales (Kiehl, 1985 y Dalzell et al., 1991).

El más reciente enfoque hacia la mecanización del compostaje ha surgido en respuesta a la necesidad de procedimientos de eliminación continuos, controlados e higiénicos para tratar las vastas cantidades de basura producidas en ciudades de población y nivel de vida crecientes (Dalzell et al., 1991).

2.3.3. Métodos de compostaje

Según Dalzell et al. (1991), la clave para un compostaje adecuado es que el procedimiento que se elija sea sencillo y pueda ser llevado a cabo con la mano de obra, la capacidad y los medios económicos disponibles. Para decidir el proceso que se empleará deben tenerse en cuenta:

- el tipo de desechos disponibles, su naturaleza, facilidad de descomposición y la posibilidad de que contengan muchos gérmenes patógenos;
- la cantidad de material a compostar;
- consideraciones geográficas tales como el clima, altura de la capa freática, etc.;
- el costo permisible en términos de mano de obra, equipo y espacio (capital disponible);
- el uso principal que se va a dar al compost (explotaciones agrícolas, huertos comerciales, viveros o recuperación de tierras).

Kiehl (1985) clasifica los métodos de compostaje de la siguiente manera:

a) En cuanto a la aireación se pueden clasificar en aerobios y anaerobios:

Los *aerobios* procuran garantizar la presencia de oxígeno, evitando la compactación de la masa o la saturación con agua, inyectando aire para la renovación de la atmósfera dentro del compost.

La descomposición aeróbica es caracterizada por la elevación de la temperatura muy por encima de la ambiente y por los tipos de gases que se desprenden, siendo el anhídrido carbónico el predominante. En la fermentación aerobia la descomposición de la materia orgánica puede alcanzar una completa estabilización.

En el método *anaerobio*, cuya fermentación la realizan microorganismos que pueden vivir en ambiente sin aire, la descomposición se da con la masa completamente inmersa en agua. En esas condiciones la temperatura se eleva poco. Siendo un medio reductor, los gases que se forman tienen mal olor. Este proceso es más lento que el aerobio, pero en compensación no exige los cuidados como el control de la temperatura, aereación y humedad como sucede con el proceso aeróbico.

- b) En cuanto a la temperatura se puede clasificar el proceso por las fases por las que pasa la materia prima durante el compostaje en: criófila, mesófila y termófila.

En la fermentación *anaeróbica*, por el efecto de la no elevación de temperatura, el proceso es *criófilo* (frío).

En la descomposición *aeróbica*, la masa se calienta por efecto del metabolismo exotérmico de los microorganismos, alcanzando una fase de temperatura considerada *mesófila* (entre 45-55°C). Prosiguiendo el aumento de la temperatura la masa entra en fase *termófila* (encima de 55°C).

- c) En cuanto al ambiente pueden clasificarse en dos tipos de procesos: en ambiente abierto o en ambiente cerrado.

Son considerados *abiertos* los procesos en los que la masa en descomposición es colocada en pilas en patios de compostaje.

Los procesos de ambiente *cerrado* son aquellos en los cuales el material a ser fermentado es colocado en digestores en forma de tambores rotativos, tanques, silos, todos con revolutores mecánicos para el movimiento de la materia orgánica.

- d) En cuanto al tiempo de compostaje pueden clasificarse en procesos lentos y procesos acelerados.

Los procesos *lentos* (compostaje natural) son aquellos en los que la materia prima a ser descompuesta es dispuesta en pilas en patios de compostaje, recibiendo aereaciones periódicas para incorporar oxígeno y activar la fermentación.

Los procesos *acelerados* son aquellos en los que se le proporciona un tratamiento especial a la materia prima, mejorando sus condiciones para la fermentación.

2.3.4. Proceso de compostaje y parámetros involucrados

Kiehl (1985), para explicar el proceso de compostaje, hace una interesante comparación entre los procesos que suceden en el mantillo forestal y los procesos que suceden en una pila de compost, realizando las siguientes consideraciones:

- Los pedólogos dividen el mantillo forestal en tres capas representadas por las letras L, F y H.

La letra L es una capa en descomposición reciente, materia orgánica cruda, con sus características originales bien definidas y que no ha perdido identidad, permitiendo diferenciar por ejemplo una hoja de un pétalo.

La capa que le sigue, designada con la letra F, de fermentación, está constituida por materia prima que está siendo atacada por microorganismos e insectos, comenzando a perder identidad. Presenta señales evidentes de desintegración física y descomposición química, coloración oscura con cierto brillo, presencia de filamentos blancos que son los micelios de los hongos y actinomicetas.

Finalmente la tercera capa, letra H de humus, corresponde al material ya descompuesto, que perdió totalmente su identidad, no pudiendo ser reconocido, con coloración oscura a negra, olor fuerte a tierra seca recién mojada, completamente desintegrado, químicamente alterado y presentando evidencia de contener una fracción coloidal porque cuando se lo aprieta entre los dedos tiñe de oscuro. La capa H se encuentra parcialmente incorporada al horizonte superficial, dando una coloración oscura a los primeros centímetros del suelo.

- Lo que ocurre en el mantillo forestal, ocurre también en el proceso de compostaje. Comienza con materia orgánica cruda, considerada una excelente materia prima que corresponde a la camada L del mantillo forestal. Después del tratamiento se tiene un material mejorado, que por intensa descomposición comienza a alterar sus características físicas, químicas y físico-químicas, como sucede en la capa F del mantillo. Finalmente la fracción orgánica se transforma en humus, un verdadero fertilizante orgánico.

La descomposición de la materia orgánica durante el compostaje es una situación constantemente cambiante en que la temperatura, pH y disponibilidad de alimento varían. El número y especie de microorganismos también cambia durante el proceso. La velocidad de progreso hacia el producto final maduro depende de varios factores que incluyen, entre otros, el suministro de nutrientes, relación C/N, tamaño de partícula, tamaño de la pila, contenido de humedad, firmeza estructural, aireación y acidez (Dalzell et al., 1991).

Según Mustin (1987), el compostaje implica una serie de etapas:

- 1) Colecta de residuos.
- 2) Preparación del sustrato:
 - a) Separación: operación que consiste en separar, cuando el material es heterogéneo, la materia orgánica de las fracciones que no son aceptables como sustrato.
 - b) Molienda: operación mecánica de reducción del tamaño de partículas. Esta reducción permite aumentar la superficie de contacto entre la masa orgánica y el volumen poroso, aumentando la velocidad de degradación.
 - c) Homogeneización: asegura la preparación de sustratos homogéneos.
- 3) Degradación: para mantener el compost dentro de los rangos óptimos de descomposición en sus diferentes estados de evolución, hay que controlar los principales parámetros que son: temperatura, disponibilidad de oxígeno, humedad, pH y naturaleza del sustrato.
- 4) Estabilización del compost: maduración, tamizado, almacenamiento, acondicionamiento y control de la distribución.

Este proceso está afectado, en mayor o menor grado, por diferentes parámetros que se analizan en detalle a continuación.

2.3.4.1. Materia prima

Prácticamente cualquier materia, de origen vegetal o animal, que haya estado viva, se descompondrá en una pila de compost. El material verde fresco se descompone muy rápidamente, la paja y el material leñoso demoran más (Dalzell et al., 1991).

Composición:

Según Mustin en 1987, en el compostaje es importante considerar que el sustrato de partida es la única fuente de nutrientes de los microorganismos descomponedores que van a realizar la transformación. Para cumplir con sus funciones vitales (crecimiento, desarrollo y reproducción) deben contar con una mínima cantidad de todos los elementos que componen el medio celular y de aquellos que les permiten desarrollar esas funciones.

En cuanto a este tema, Dalzell et al. (1991), afirma que el material orgánico, bien de origen industrial, doméstico o agrario, es una mezcla de azúcares, proteínas, hemicelulosas, celulosa, lignina y minerales en un amplio rango de concentraciones. Algunos de ellos, como los azúcares, son de forma simple y fácilmente solubles en agua. Pueden ser rápidamente absorbidos por los microorganismos, suministrando energía y elaborándose polímeros a partir de ellos.

Sostiene que existen otras sustancias, las hemicelulosas y celulosas, que tienen grandes moléculas que antes de poder ser usadas deben ser partidas por enzimas. La lignina es un material leñoso, altamente resistente y sólo se descompone después de un período muy largo de tiempo.

Relación C/N:

El carbono es el principal componente de las moléculas orgánicas y fuente de energía de los microorganismos responsables de la descomposición aeróbica.

Los microorganismos que realizan la descomposición de la materia orgánica absorben los elementos carbono y nitrógeno en la proporción 30 a 1, eliminando 2/3 del carbono en forma de anhídrido carbónico e inmovilizando en su protoplasma 1/3 del carbono. Los sustratos orgánicos pierden más rápidamente su carbono -metabolizado a gas carbónico- que su nitrógeno -metabolizado y transformado a formas de compuestos de nitrógeno volátiles como el amonio que puede combinarse con una nueva porción de carbono de la materia orgánica aún no descompuesta y ser inmovilizado en el protoplasma- (Kiehl, 1985; Mustin, 1987; Díaz et al., 1998).

La relación C/N óptima para la conservación del nitrógeno y rápida descomposición varía entre 25/1 y 30/1 (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998). Es deseable que la relación C/N esté en el rango de 25 a 35/1 en la mezcla inicial (Dalzell et al., 1991). Para un compuesto poco fermentable, la relación C/N óptima original está entre 30 y 35 (Mustin, 1987).

Cuando un abono orgánico con relación C/N alta es aplicado en el suelo, los microorganismos, además de reciclar el nitrógeno de los microorganismos que mueren, retiran nitrógeno del suelo en forma nítrica o amoniacal. De esta manera reducen la elevada proporción del carbono respecto al nitrógeno, quedando el nitrógeno "inmovilizado" en forma de biomasa celular. Cuando el exceso de carbono es eliminado, el sustrato del suelo estará siendo mineralizado, es decir, el nitrógeno orgánico se estará transformando en nitrógeno mineral soluble, volviendo a estar disponible para las raíces. Estos residuos deben recibir el agregado de nitrógeno orgánico o mineral para bajar la relación y acelerar así el proceso de descomposición (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998).

Cuando se da el caso opuesto, donde la relación C/N de la materia a ser compostada es baja, en el entorno de 5-10/1, los organismos tienen a disposición un alto tenor de nitrógeno y bajo de carbono como fuente de energía. En estos casos, utilizan todo el carbono disponible y eliminan el exceso de nitrógeno en forma amoniacal. Esa liberación de amoníaco a la atmósfera causa pérdidas de nitrógeno en el producto final. En este caso se recomienda agregar restos vegetales celulósicos para elevar la relación C/N a un valor próximo al ideal (33/1 para materia prima a ser compostada). Relaciones más bajas provocan pérdidas prácticamente inevitables de nitrógeno en forma de amoníaco y altas relaciones tornan el proceso muy prolongado (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998).

En el cuadro siguiente se pueden observar los valores de relación C/N de diferentes materiales.

Cuadro Nº 2 - Relación C/N de diferentes materiales.

Estado del material	C/N
Relación C/N de materia orgánica de difícil descomposición	60/1 a 35/1
Relación C/N de materia orgánica de fácil descomposición	30/1 a 19/1
Relación C/N de abono semi-curado (bioestabilizado)	18/1 a 15/1
Relación C/N de abono curado (humificado)	14/1 a 10/1

Fuente: Kiehl, 1985.

La relación C/N decrece constantemente durante el proceso de compostaje hasta estabilizarse en 10 cuando el compost está terminado (Mustin, 1987). Esa relación 10/1 es la ideal de un compost maduro, pero muy difícil de alcanzar con el compostaje debido a la variabilidad de la fracción carbono de los diferentes residuos. Relaciones de alrededor de 20 son aceptables para compost que son bioestables y hay estudios que han llegado a relaciones de 35 en compost considerados estables (Mathur et al., 1993).

A pesar de todo lo mencionado anteriormente, no puede utilizarse únicamente este parámetro para determinar la madurez de un compost (Mathur et al., 1993).

Granulometría:

La granulometría es la medida de la dimensión de partículas del material. Es la proporción relativa de repartición de partículas en diferentes intervalos de dimensiones (Mustin, 1987).

Un material es descompuesto más rápidamente cuanto más eficaz es el ataque de los microorganismos y cuanto más grande es la superficie de contacto. Teóricamente lo ideal sería contar con un material muy fino, pero esto es impracticable por razones económicas y técnicas ya que deben mantenerse adecuadas condiciones de aereación. Por lo tanto, es necesario un término medio en el tamaño de partículas. Para pilas de compost que emplean un flujo natural de aire, un tamaño de partícula de aproximadamente 50 mm es apropiado. Para sistemas de compostaje que tienen suministro de aire forzado, el tamaño de partícula puede ser de hasta 10 mm (Kiehl, 1985; Dalzell et al., 1991).

Preparación de la materia prima para el compostaje:

Según Kiehl (1985), algunas de las principales correcciones que pueden hacerse a la materia prima se resumen en:

- a) Mejora de la relación C/N: agregando materiales ricos en nitrógeno (estiércol, camas animales, fertilizantes minerales nitrogenados, etc.) cuando la materia prima tiene alta relación C/N y juntar material celulósico cuando la materia prima es rica en proteínas como son en general los residuos animales, con baja relación C/N.
- b) Mejora de granulometría pasando los materiales vegetales groseros por picadores, reduciendo sus dimensiones entre 1 y 5 cm y juntando materiales que tornen a la pila voluminosa y porosa cuando la granulometría de la materia prima es muy fina.
- c) Mejora de reacción ácida de los residuos juntándose calcio o ceniza vegetal u otro producto alcalino, para que el pH no pase de 8.

Daizell et al. (1991) agregan, en relación a este tema, que se pueden adicionar materiales a la materia prima para mejorar la composición química y la estructura física de la pila, suministrar microorganismos convenientes y reducir las pérdidas de nitrógeno. Clasifica estos materiales en:

- activadores (para corregir la relación C/N inicial);
- inoculantes (cultivos especiales de bacterias);
- otros materiales (como por ejemplo fosforita molida o fosfato cálcico que aceleran el proceso y tierra en forma seca que no sólo introduce microorganismos sino que también mantiene nitrógeno amoniacal absorbido);
- enriquecimiento del compost (nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio).

Según Miller et al. (1988), incrementando las cantidades de activadores en una mezcla de compostaje se van a incrementar los nutrientes disponibles y, por lo tanto, estimular la actividad metabólica. Como resultado de esto, aumenta también la probabilidad de que se limite el oxígeno o que ocurran temperaturas excesivas. Otro tipo de efectos pueden ser los cambios de pH debidos a la liberación de amoníaco o el secado del compost como consecuencia de la liberación de calor metabólico. El estiércol de gallina es por lejos el activador más usado alrededor del mundo (Allan Mair, 1985; Fermor et al., 1985; cit. por Miller et al., 1988) ya que es 2 o 3 veces más concentrado en nutrientes que el estiércol de otros animales (Kiehl, 1985). La proporción C:N:S en fracciones orgánicas estables como el humus es aproximadamente 100:7:1 (Stevenson, 1982 cit. por Miller et al., 1988). En el estiércol de gallina la proporción C:N:S puede ser 100:18:2 (Banwart y Bremner, 1975 cit. por Miller et al., 1988).

2.3.4.2. Dimensión de las pilas

La disposición de las pilas en el campo debe realizarse de forma de mantenerlas paralelas y espaciadas para facilitar las aereaciones (Kiehl, 1985).

Tamaño:

Con la cantidad de material disponible se debe construir normalmente una pila tan grande como sea posible, a condición de que el aire pueda penetrar en la masa. El tamaño máximo no debe sobrepasar normalmente 1,5 m de altura y 2,4 m de ancho. La altura disminuirá considerablemente a medida que avance el compostaje. Si se montan pilas muy altas se corre el riesgo de que las capas superiores ejerzan presión sobre las inferiores, compactándolas (Kiehl, 1985; Dalzell et al., 1991). Agregan que la difusión de oxígeno a ese lugar es impedido, creándose condiciones anaeróbicas que producen la reacción de compuestos de carbono, nitrógeno, azufre y fósforo que provocan malos olores (Mathur et al., 1993). Las pilas bajas, por el contrario, pierden calor más fácilmente y no se calientan lo suficiente como para destruir patógenos (Kiehl, 1985).

La parte externa de una masa en compostaje estará fría y su temperatura variará entre la ambiente de la superficie y la temperatura en el núcleo de la masa a 15 cm de la superficie. Por esto, cuanto mayor sea la masa de la pila, mayor será el volumen del núcleo central que alcance temperaturas adecuadas para la destrucción de los patógenos y de semillas de malezas. Las pilas pequeñas tienen una mayor relación superficie-volumen que las grandes y, por tanto, pierden más calor relativamente (Dalzell et al., 1991).

Forma:

En cuanto a la forma, las pilas pueden tener sección triangular o trapezoidal. La triangular es recomendada para estaciones lluviosas ya que favorece el escurrimiento de agua. La trapezoidal, por el contrario, facilita la infiltración de agua (Díaz et al., 1998).

2.3.4.3. Microorganismos

La conversión de materia orgánica cruda, biodegradable, en materia orgánica humificada es llevada a cabo por organismos como bacterias, hongos y actinomicetes principalmente.

Los residuos vegetales y animales no son igualmente atacados ni se descomponen enteramente de una sola vez. Sus diferentes constituyentes se descomponen en diferentes estadios, con diferentes intensidades y por diferentes poblaciones de microorganismos. Es así que los azúcares, el almidón y las proteínas solubles, de más fácil descomposición, son atacados primero. Luego son atacadas ciertas hemicelulosas y el resto de las proteínas. La población microbiana que realiza tales descomposiciones es variada y se va alternando y predominando en el medio de acuerdo a la cantidad y tipo de material existente. La celulosa, ciertas hemicelulosas y grasas, son descompuestas más lentamente y por organismos específicos. Por último la lignina, ciertas grasas y taninos son materiales considerados como los más resistentes a la descomposición (Kiehl, 1985).

Los grupos de microorganismos del compost tienen las siguientes características generales:

- Las bacterias están siempre presentes en el compost, dominando en cantidad y calidad. Si la relación C/N del material a descomponer es baja y la humedad alta su crecimiento es importante. Tienen actividad en un amplio rango de pH, sobre todo en sustratos frescos.
- Los hongos predominan si la relación C/N del material es alta, ya que degradan celulosa y lignina. En ese medio su biomasa es superior que la de bacterias. Son capaces de crecer con tasas de humedad bajas y toleran un amplio rango de pH.
- Los actinomicetes atacan sustancias no degradadas por bacterias y hongos, como ser la quitina. Son neutrófilos, toleran pH ligeramente básicos y son poco competitivos con los otros grupos. Se desarrollan en condiciones poco adecuadas para los demás grupos de microorganismos o en la fase final de maduración.

En su actividad, los microorganismos del compost, en un momento dado crean sus propias condiciones de destrucción que se transforman en óptimas para la siguiente población. Existe autoselección de las especies y grupos de microorganismos (Mustin, 1987). Esto constituye una sucesión de microorganismos, predominando unos u otros dependiendo de las condiciones del medio.

Diversos parámetros ambientales determinan la composición de la microflora durante el proceso de compostaje. Ellos son:

Temperatura:

A continuación se presenta un cuadro con los valores de temperatura que determinan los microorganismos que predominan durante el proceso.

Cuadro Nº 3 - Grupos de microorganismos predominantes durante el proceso de compostaje en función de la temperatura.

Grupo	Mesófilos (hasta 40°C)	Termófilos (40 - 70 °C)	Mesófilos (menos 70°C)
Bacterias:			
Mesófilas	10 ⁸ UFC/gr.	10 ⁶ UFC/gr.	10 ¹¹ UFC/gr.
Termófilas	10 ⁴ UFC/gr.	10 ⁹ UFC/gr.	10 ⁷ UFC/gr.
Actinomicetes:			
Termófilos	10 ⁴ UFC/gr.	10 ⁸ UFC/gr.	10 ⁵ UFC/gr.
Hongos:			
Mesófilos	10 ⁶ UFC/gr.	10 ³ UFC/gr.	10 ⁵ UFC/gr.
Termófilos	10 ³ UFC/gr.	10 ⁷ UFC/gr.	10 ⁶ UFC/gr.

Fuente: Mustin (1987).

Al inicio de la descomposición de los restos orgánicos, en la fase mesófila, predominan bacterias y hongos mesófilos, productores de ácidos. Posteriormente, continúa elevándose la temperatura pasando a la fase termófila, donde la población dominante es la de actinomicetes, bacterias y hongos termófilos o termotolerantes (Kiehl, 1985). Compuestos de nitrógeno son degradados a aminoácidos y amonio. Algunas porciones de estos compuestos son asimilados por microorganismos heterótrofos que derivan su energía a la oxidación de compuestos de carbono. Esta oxidación genera calor y es la responsable de la fase termofílica del proceso (45 a 70°C). Durante esta fase, los organismos que oxidan amonio están en desventaja en relación con los heterótrofos (transforman nitrógeno orgánico en amonio) por tres motivos: primero por la temperatura fuera de su rango óptimo (28°C), segundo por la competencia por amonio que está siendo asimilado por los heterótrofos y tercero por la competencia por el oxígeno que está siendo usado para la mineralización del carbono (Mathur et al., 1993).

Pasada la fase termófila, el compost va perdiendo calor y retornando a la fase mesófila, pero ahora con otra composición química ya que los azúcares y almidones deben haber sido consumidos por los organismos. Hongos y bacterias mesófilos reaparecen. Esta segunda fase mesófila es generalmente más larga en relación a la termófila (Díaz et al., 1998).

El proceso termina cuando la temperatura del compost se torna próxima a la ambiental. En esa fase final, en que la temperatura disminuye, pueden ser encontrados protozoarios, nematodos, hormigas, miriápodos e insectos (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998).

A pesar de encontrarse en las capas más externas y predominar en la masa en las fases más avanzadas del proceso, los hongos y actinomicetes desempeñan un papel importante en la descomposición de la celulosa y otros materiales más resistentes, los cuales son atacados después de la digestión de aquellos que se descomponen con mayor facilidad (Kiehl, 1985). Según Dalzell et al. (1991), es por esa razón que en las masas en compostaje se deben crear condiciones que favorezcan la actividad de esos microorganismos.

Es importante considerar también que las altas temperaturas son deseables ya que destruyen organismos patógenos, perjudiciales para los cultivos.

Humedad:

Este parámetro también determina la actividad de los diferentes grupos de microorganismos durante el proceso de compostaje.

Las bacterias y los actinomicetes aumentan su actividad si la humedad relativa está por encima de 93%, aunque estos últimos son un poco más resistentes a las condiciones de sequía que las bacterias. Los hongos ven favorecida su actividad en un rango de humedad relativa que va desde 61% como mínimo hasta 75%. Es decir que si la humedad relativa es inferior a 93%, sólo los hongos mantienen la actividad de compostaje y la temperatura baja a 40-50°C (Mustin, 1987).

pH:

En cuanto al pH, las bacterias tienen actividad en un rango de pH óptimo entre 6 y 8 y los hongos entre 5 y 8.

2.3.4.4. Otros nutrientes

Los residuos orgánicos que serán compostados tienen, generalmente, mayor proporción de nitrógeno que de fósforo y potasio. El nitrógeno es, de esos tres nutrientes, el que más varía en contenido en el compost y el que más fácilmente se pierde por volatilización o lavado (Kiehl, 1985).

Nitrógeno:

La concentración de amonio generalmente aumenta al inicio del proceso y después decae, justo cuando la concentración de nitratos comienza a incrementarse (Mathur et al., 1993).

Los nitrificadores son microorganismos mesofílicos, autótrofos, que necesitan para que su actividad sea óptima temperaturas de 28°C, niveles de oxígeno adecuados y que la competencia con organismos heterótrofos no sea intensa (Mathur et al., 1993).

Pérdidas de nitrógeno:

Algunas de las principales causas de pérdida de nitrógeno como amonio durante el compostaje están relacionadas, según Kiehl (1985), con los siguientes factores:

- relación C/N (materiales de baja relación C/N tienen mayores pérdidas de nitrógeno);
- pH (cuanto más alcalino, más amonio se volatiliza);
- contenido de humedad (cuanto menos humedad, menos amonio retenido);
- aireación (cuanto más aireación, menos humedad y, por lo tanto, menos amonio retenido);
- forma de compuestos nitrogenados (como radical amonio es adsorbido al humus y arcillas o absorbido por los poros, reduciendo las pérdidas; como nitrato es soluble y se puede lavar con el agua).

Fósforo:

Según Mustin (1987), los tenores óptimos Nitrógeno/Fósforo (N/P) varían entre 2 y 5, en función de la biodegradabilidad de los materiales que entrarán en compostaje. Como tenores mínimos están los estiércoles con 0,5 a 0,6% de P en materia seca y 0,5 a 1% para los desechos compostables.

Potasio, Calcio y Magnesio:

Para el potasio (K) los tenores óptimos son del mismo orden, 0,2 a 0,5% de la materia seca y para los otros elementos como el azufre (S), el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), los tenores limitantes son extremadamente variados. Se considera que con tenores superiores a 0,1 a 0,2% del elemento en la materia seca se evitarían problemas en el aporte de estos nutrientes (Mustin, 1987).

2.3.4.5. Aireación

Un suministro adecuado de aire a todas las partes de una pila de compost es esencial para el suministro de oxígeno a los organismos y para eliminar el dióxido de carbono producido. La ausencia de aire (condiciones anaeróbicas) conduce al desarrollo de distintos tipos de microorganismos, causando o bien una conservación ácida (similar al ensilaje) o una putrefacción de la pila que produce malos olores (Dalzell et al., 1991).

Todos los organismos aerobios consumen oxígeno para oxidar los compuestos orgánicos que les sirven de nutrientes. Si el tenor de oxígeno baja demasiado, los microorganismos aerobios mueren y son sustituidos por anaerobios, que descomponen la materia orgánica con más lentitud, produciendo malos olores y atrayendo moscas (Mustin, 1987; Díaz et al., 1998).

La disponibilidad de oxígeno va a determinar, además, qué reacciones ocurrirán y cuándo los productos de la descomposición química y biológica tenderán a oxidarse o a reducirse (Miller et al., 1988).

La regulación de la descomposición se obtiene en particular con el control de la aereación (Mustin, 1987). La aereación se logra por el movimiento natural del aire hacia el interior de la pila de compost, mediante el volteo periódico del material, a mano o con una máquina o insuflando aire en la pila usando un ventilador. El movimiento natural del aire sigue el "efecto chimenea" en el que las corrientes de convección cálidas se elevan a través y hacia fuera de la pila. No obstante, esto puede no ser suficiente para suministrar el oxígeno necesario en las etapas tempranas del procedimiento, llevando a condiciones anaeróbicas a las regiones centrales inferiores de la pila de material (Dalzell et al., 1991).

El porcentaje de oxígeno baja bastante en los primeros días de proceso y luego comienza a crecer nuevamente. A medida que el proceso de compostaje avanza, la actividad microbiana decrece. En esos momentos se consume menos oxígeno y se produce menos anhídrico carbónico. La respiración en compost maduros es mucho menor que al inicio del proceso (Mathur et al., 1993).

Si existe posibilidad de determinar el contenido de gas carbónico existente en el compost, se puede emplear ese parámetro para calcular la necesidad de aereación. La descomposición pierde intensidad cuando la concentración de gas carbónico está por encima de 3% y se paraliza por encima de 10%. Por lo tanto, el oxígeno existente en el compost debe estar siempre en una concentración mayor al 10% y, preferiblemente, encima del 17% (Hoitink e Ipoole, 1980 cit. por Van Schoor et al., 1988; Kiehl, 1985).

Como la concentración de oxígeno es una medida difícil de tomar, el momento adecuado para hacer el mezclado es decidido en función de otros factores como la temperatura (evitar temperaturas superiores a 70°C); la humedad (superior a 55-60%); el intervalo en días (si existe un esquema rígido prefijado) o la presencia de moscas y malos olores, indicadores de estado de putrefacción (Díaz et al., 1998). En sistemas de compostado sencillos, que usan flujo natural de aire, voltear la pila 2 o 3 veces debería ser suficiente (Dalzell et al., 1991).

En cuanto a los materiales que componen las pilas, Kiehl (1985) afirma que los de consistencia más firme y con granulometría gruesa, considerados estructuralmente resistentes, garantizan una mejor aereación porque no se compactan por la presión ejercida de las capas superiores. En cambio materiales tiernos, amorfos y de granulometría fina, generan pocos espacios porosos, siendo difícil mantener una buena aereación de las pilas. Como la fuente de oxígeno para los microorganismos es el aire en los poros del material, cuanto mayor es la porosidad (fundamentalmente la macroporosidad), mayor será el nivel de oxígeno con que cuentan.

2.3.4.6. Humedad

Siendo el compostaje un proceso biológico de descomposición de materia orgánica, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, los cuales no viven en ausencia de humedad. Si se incorporara oxígeno artificialmente al medio de cultivo, la materia orgánica podría ser descompuesta aeróbicamente en un ambiente saturado de agua. Sin embargo, debido a la necesidad de agua y aire al mismo tiempo, se hace necesario encontrar límites mínimos y máximos que los diferentes residuos deben presentar para que esos factores sean tenidos en cuenta (Kiehl, 1985).

Según Dalzell et al. (1991), cuando el contenido de humedad está por debajo del 30% en peso fresco, las reacciones biológicas en una pila de compost se retardan. Cuando el contenido de humedad es demasiado alto los espacios entre las partículas del material se saturan de agua, impidiendo el movimiento del aire dentro de la pila. El contenido óptimo de humedad de los materiales a compostar es de 50-60%. Debajo de 12% cesa prácticamente toda la actividad biológica, tornándose el proceso extremadamente lento mucho antes de alcanzar ese límite (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998).

El control de la humedad consistirá, entonces, en mantener este parámetro dentro de los límites recomendados (Kiehl, 1985). Cuando la actividad de compostaje disminuye, muchas veces puede ser porque la tasa de humedad está muy baja. De aquí surge la importancia del control de la humedad durante el proceso de compostaje (Kiehl, 1985; Mustin, 1987).

A continuación se presenta una lista con los tenores de agua óptimos de diversos sustratos.

Cuadro Nº 4 - Niveles de humedad óptimos de diferentes sustratos.

Naturaleza del sustrato	Tenor de agua (% del peso total)
Paja	75-85
Aserrín	75-90
Papel (celulosa)	55-65
Estiércol	55-65
Residuos domésticos	55-65
Desechos vegetales frescos	45-55

Fuente: Mustin, 1987.

Según Kiehl (1985), las investigaciones han demostrado que la materia orgánica a ser compostada debe tener una humedad óptima en el entorno de 50%, siendo los límites máximo y mínimo deseables iguales a 60 y 40% respectivamente. Los materiales más groseros y fibrosos pueden iniciar el proceso sin riesgo de que ocurra anaerobiosis con otros porcentajes de humedad un poco por encima al límite máximo (60%). En cambio otras sustancias de granulometría fina presentan tendencia a compactar, necesitando que el contenido de humedad inicial sea inferior a 60%.

En el compost se van a encontrar, igual que en el suelo, dos tipos de poros: microporos (retienen agua por capilaridad) y macroporos (cuyos vacíos están ocupados normalmente por aire, excepto en condiciones de anegamiento que son ocupados por agua). El porcentaje de porosidad total es igual a la suma de macro y microporosidad. Los materiales groseros tienen mayor porcentaje de macroporosidad, mientras que en los de granulometría fina predominan los microporos (Díaz et al., 1998).

Según Kiehl (1985), a medida que la materia orgánica se va humificando, va aumentando su capacidad de retener agua.

Durante el proceso, en la operación de control de humedad, es importante que todas las capas de la pila de compost tengan igual contenido de agua. Para eso se realizan las aereaciones que mezclan las capas externas, más secas, con las internas, más húmedas (Kiehl, 1985).

2.3.4.7. Temperatura

Como bien afirma Mustin (1987), el factor temperatura es uno de los parámetros más importantes del compostaje. La energía liberada bajo forma de calor por la fermentación aeróbica es el origen de la elevación de la temperatura de la masa en compostaje, de la destrucción de gérmenes y patógenos, de la evaporación de agua y de la degradación acelerada de los compuestos orgánicos. El flujo de calor producto de la descomposición es un factor directo de la fermentación aeróbica. La subida de temperatura es una medida indirecta de la intensidad de degradación.

Una vez montada la pila, la elevación de la temperatura es la primera información que se tiene de que el proceso de descomposición comenzó. Si no se eleva la temperatura dentro de los dos primeros días de proceso, eso indica el fracaso del compostaje por uno o más factores como ser, entre otros, la actividad microbiológica; la falta de oxígeno por exceso de agua; material de granulometría muy fina que provoca compactación en la pila, etc. Controlado el factor que provocó el fracaso, la descomposición comenzará y con eso la temperatura se elevará. (Kiehl, 1985).

La pila de compost pasa a través de etapas de calentamiento gradual, temperatura máxima, enfriamiento y maduración (Dalzell et al., 1991). Montada la pila, generalmente alcanza temperaturas de 40 a 50°C dentro de 2 o 3 días, pudiendo llegar a 60 o 70°C antes de 15 días, si las condiciones son favorables (Kiehl, 1985).

El compost parte de temperatura ambiente y pasa rápidamente a la fase mesófila, subiendo luego a la termófila donde se mantiene constante por un tiempo. A medida que la descomposición continúa, si no existen limitantes de humedad ni oxígeno, la temperatura bajará manteniéndose constante nuevamente en la fase mesófila. Finalmente, después de 100 o 120 días como mínimo, la temperatura bajará más acercándose a los valores de temperatura ambiente. En ese punto se llega a la madurez del compost, la materia orgánica está humificada (Kiehl, 1985).

Según Mustin (1987), las temperaturas óptimas serán aquellas que permitan alcanzar los siguientes objetivos: desinfección del sustrato, rapidez de degradación y humificación activa.

Cuando la materia orgánica es descompuesta en pequeño volumen, el calor generado por el metabolismo de los microorganismos se disipa y el material no se calienta, mientras que si se hacen pilas en grandes masas, por ser materiales aislantes térmicos, el calor desarrollado se acumula y la temperatura alcanza valores elevados, pudiendo llegar cerca de los 80°C. Las altas temperaturas son consideradas deseables por el hecho de destruir semillas de malezas y organismos patógenos, que son poco resistentes a temperaturas en torno de 50 a 60°C por cierto período de tiempo (Díaz et al., 1998).

Las fajas de temperatura que definen la predominancia de determinados grupos deben ser mesófilas o termófilas, pues cuanto mayor sea el calor, más rápida será la descomposición. Se considera que la faja óptima se da entre 50 y 70°C, siendo 60°C la más indicada. Sin embargo, estas temperaturas altas no deben extenderse por largos períodos porque restringen el número de microorganismos que consiguen vivir, insolubilizan proteínas hidrosolubles, provocan alteraciones químicas indeseables y desprendimiento de amoníaco principalmente cuando el material posee baja relación C/N (Kiehl, 1985; Díaz et al., 1998).

El desarrollo de la temperatura está relacionado con varios factores: materiales ricos en proteínas, con relación C/N baja, se calientan más rápidamente y alcanzan mayor temperatura que los celulósicos, con elevada relación C/N. Materiales molidos, con granulometría fina y mayor homogeneidad, forman pilas con mejor distribución y menor pérdida de calor. Pilas con material grosero, que proporciona buena aereación, alcanzan altas temperaturas, pero están sujetos a pérdidas de calor mayores que los anteriores (Díaz et al., 1998).

La práctica ha demostrado que se puede establecer una relación aproximada entre la temperatura del proceso de compostaje y el grado de descomposición, cuando todo ocurre normalmente y no hay exceso o falta de agua. Se considera que después de la fase termófila el compost debe estar semi-estabilizado y luego de la nueva fase mesófila, estará humificado (Díaz et al., 1998).

2.3.4.8. pH

El rango óptimo de pH para el compostaje depende de las condiciones óptimas de vida de los microorganismos y se sitúa alrededor de la neutralidad (7). La mayoría de las bacterias tienen un pH óptimo de crecimiento alrededor de la neutralidad. Los hongos son más tolerantes y presentan actividad en un rango de pH entre 5 y 8. Esta propiedad les confiere una buena competitividad con las bacterias. A pesar de que existen fases de pH ácidos durante el proceso de compostaje, nunca es menor a 5 como para inhibir la actividad de las bacterias.

A lo largo del compostaje suceden diversos procesos que hacen variar el pH de la masa en descomposición. De esta manera diferencian al proceso en 4 fases:

Fase I: el pH disminuye. Fase de acidificación por intensa producción de gas carbónico y ácidos orgánicos en el comienzo de la fase termófila (domina la flora mesófila).

Fase II: el pH aumenta. Fase de alcalinización con flora termófila dominante, con hidrólisis bacteriana del nitrógeno proteico y orgánico, produciendo amonio (base).

Fase III: fase de estabilización del pH. La relación C/N disminuye, las reacciones se hacen más lentas. El amoníaco se pierde por volatilización y el nitrógeno es usado por los microorganismos para realizar biosíntesis de materias húmicas.

Fase IV: fase estable, próximo a la neutralidad. El compost está en proceso de maduración (Mustin, 1987; Guedes de Carvalho et al., 1990).

2.3.5. Compostaje de residuos forestales

Luego de analizados en detalle todos los parámetros involucrados en el proceso de compostaje, se presenta a continuación un cuadro donde se resumen los valores óptimos para cada uno de ellos.

Cuadro Nº 5 - Parámetros óptimos del proceso de compostaje.

Parámetro	Valor óptimo
Relación C/N del material	25 a 35/1
Tamaño de partículas	10 mm para sistemas con agitación y aereación forzada. 50 mm para pilas largas y aereación natural.
Contenido de humedad	50 a 60%
Flujo de aire	0,6 a 1,8 m ³ aire/día/kg de sólidos volátiles durante el estado termofílico o mantener el nivel de oxígeno del 10 a 18%.
Temperatura	55 a 60°C durante 3 días.
Agitación o volteo	Desde la no agitación al volteo regular en sistemas sencillos. Ráfagas cortas de agitación vigorosa en sistemas mecanizados.
Control de pH	Normalmente no es necesario.
Tamaño de la pila	Cualquier longitud, 1,5 m de altura y 2,5 m de ancho para las pilas con aereación natural. Con aereación forzada el tamaño de la pila depende de la necesidad de evitar sobrecalentamiento.

Fuente: Dalzell et al. (1991)

Los residuos forestales tienen ciertas características que los diferencian del resto de los residuos orgánicos y, por lo tanto, si se quiere analizar su compostaje deben realizarse algunas consideraciones particulares.

Los sustratos con altos contenidos de lignina provienen esencialmente de la producción forestal. Los mecanismos bioquímicos que entran en juego para la degradación de estos compuestos clasificados como poco o muy poco degradables depende de la entrada en acción de enzimas particulares que atacan esas moléculas: las fenol-oxidasas. De los residuos forestales, las cortezas son las que principalmente se usan para ser compostadas (Mustin, 1987). El término corteza se refiere a todo lo que está en el exterior del último anillo de xilema secundario (Maggs, 1985 cit. por Van Schoor et al., 1988). Pueden tener una composición muy variable dependiendo del origen de la corteza. Se presentan a continuación dos ejemplos para pino marítimo (Zuang, 1979; Veschambre et al., 1982; cit. por Moinereau et al., 1987):

1) Materia orgánica (98%)	Lignina	45% de materia seca
	Celulosa	40% de materia seca
	Azúcares	13% de materia seca
Materia mineral (2%)	Nitrógeno	0,4%
	Fósforo	0,04%
	Potasio	0,25%
2) Lignina	46,3%	
Celulosa	23,0%	
Hemicelulosa	19,1%	
Ceras y resinas	3,9%	
Taninos	3,3%	
Almidón y pectinas	4,4%	

Los macro y microelementos se distribuyen de la manera siguiente:

Carbono	50% de materia seca
Nitrógeno	0,36% de materia seca
Calcio	2,9% de materia seca
Silicio	1,32% de materia seca
Potasio	1% de materia seca
Magnesio	0,5% de materia seca
Aluminio	0,38% de materia seca
Fósforo	0,37% de materia seca
Hierro	1,43 mg/kg de materia seca
Zinc	15 mg/kg de materia seca
Manganeso	84 mg/kg de materia seca
Cobre	16 mg/kg de materia seca

Mc Ginnis & Parikh en 1975 (cit. por Van Schoor et al., 1988), listaron el contenido de la corteza de *Pinus taeda*:

17,3%	extracto soluble neutro
20,8%	extracto soluble al álcali
20,4%	lignina luego de la extracción con álcali
41,7%	holocelulosa
0,7%	cenizas

La importancia del extracto soluble neutro es que es el responsable de las propiedades fitotóxicas de la corteza, siendo los flavonoides los más importantes dentro de este grupo y están incorporados dentro de los taninos y los ácidos fenólicos (Van Schoor et al., 1988).

Dentro de los constituyentes orgánicos se encuentran taninos, celulosa y lignina. Los taninos son los que le confieren a la corteza su olor característico y son tóxicos para las plantas de semilla que crecen en la corteza (Van Schoor et al., 1988). La celulosa varía con la especie y la edad del árbol, observándose valores más altos en árboles jóvenes y en las ramas (Howard, 1973 y Labosky, 1979, cit. por Van Schoor et al., 1988). Por efecto del proceso de compostado, la celulosa es más rápidamente descompuesta por los microorganismos y es ella la que determina los requerimientos de nitrógeno en el compostado (Hoitink y Poole, 1979, cit. por Van Schoor et al., 1988). Por último, la lignina se encuentra en mayor porcentaje que la celulosa y es más resistente a la degradación enzimática (Alexander, 1961, cit. por Van Schoor et al., 1988).

La corteza de pino es, asimismo, un sustrato ligero (densidad inferior a 400 kg/m³), muy poroso, aereado, con débil retención de agua y pH entre 4 y 5,5, por lo que puede necesitar una neutralización antes de usarlo para cultivo. (Moinereau et al., 1987). La corteza no es un sustrato inerte y como la mayoría de los sustratos orgánicos se descompone lentamente y se perturba la nutrición de nitrógeno y el equilibrio aire-agua en el medio (Veschambre et al., 1982 cit. por Moinereau et al., 1987).

Degradaciones aeróbicas de residuos como las cortezas pueden generar suficiente calor como para desinfectar los residuos, pero no produce compost ricos en nutrientes para las plantas. El compost adquiere esta capacidad luego de muchos procesos biológicos y físico-químicos que se dan durante la transformación de los residuos. Si no se completan todos esos procesos, el compost se mantiene inmaduro (Mathur et al., 1993).

En cuanto a la granulometría de la corteza como materia prima del proceso de compostaje, Van Schoor et al. (1988) consideran que un adecuado tamaño de partícula se obtiene pasando el material por un molino de martillo y luego por zaranda de 25 a 50 mm de abertura, lo que proveerá un tamaño de partícula menor o igual a 30 mm. Este tamaño permite la presencia de suficientes espacios de aire dentro de la pila.

Uno de los mayores inconvenientes de las cortezas frescas es que presentan una alta relación C/N (entre 100 y 400/1). Debido a ello tienen un gran déficit de nitrógeno que debe ser corregido a través de la incorporación de nitrógeno orgánico o inorgánico (Van Schoor et al., 1988). En este sentido, las recomendaciones generales son de incorporar 4 kg de urea/m³ (Zottel, 1988 cit. por Van Schoor et al., 1988). Además tienen sustancias fitotóxicas (terpenos) y bacteriostáticas (taninos). El compostaje puede demandar 8 o 10 meses, pero el producto que se obtiene es totalmente estable (Moinereau et al., 1987).

Son materiales que presentan una débil velocidad de degradación, lo que no permite la producción de flujos calóricos importantes. La elevación de la temperatura es lenta y no va más allá de 60°C. Solamente la realización de grandes pilas o una muy buena insolación permiten obtener temperaturas más elevadas (Mustin, 1987).

En cuanto al pH, Van Schoor et al. (1988) mencionan que la corteza de pino recién molida es altamente ácida (4 a 4,3). Durante el compostaje hay un aumento inicial del pH, que luego va decreciendo a lo largo del proceso hasta que, por la eliminación de ácidos orgánicos naturales, la pila se estabiliza eventualmente entre 4 y 5 de pH.

Los recursos madereros, por contener gran cantidad de lignina, necesitan usualmente períodos bastante largos de compostaje, entre 6 y 12 meses, para obtener un producto maduro y estable (Bagstam, 1979 y Hoitink et al., 1982 cit. por Van Schoor et al., 1988; Kakezawa et al., 1990).

2.3.6. Duración del proceso

Variables tales como la especie, su composición química, el tamaño de partícula, la dimensión de las pilas, el contenido de nitrógeno, el contenido de humedad, la aereación y la temperatura, afectan directamente el nivel de degradación, la calidad del compost y las propiedades funguicidas (Campbell et al., 1991). Dependerá también, en cierta medida, de los tipos de desechos que se utilicen. El material vegetal verde se descompondrá rápidamente y los fragmentos de material leñoso resistente se descompondrán lentamente en la pila (Dalzell et al., 1991). Partículas gruesas necesitan de mayor plazo para ser descompuestas por los microorganismos, siendo la descomposición ayudada por las aereaciones. El exceso de humedad demora el proceso y la falta de agua paraliza la descomposición (Kiehl, 1985).

El potencial de inmovilización del nitrógeno y el nivel máximo de descomposición de un sustrato ha sido caracterizado por la relación C/N. Se acepta que residuos con una alta relación C/N se descomponen en forma más lenta que aquellos con una relación baja (Parr y Papendick, 1978 cit. por Campbell et al., 1983).

Es necesario, según afirma Kiehl (1985), aclarar cuál es el producto final que se quiere obtener y qué cualidades requiere. Por experiencia se sabe que no se consigue un compost bioestabilizado antes de 30 o 60 días y humificado antes de 90 a 120 días.

El proceso de compostaje se completa generalmente entre 4 y 6 meses. De todas formas, este período se puede reducir a 2 meses agregando microorganismos comerciales, los que son usados como catalizadores biológicos (Thanyadi, 1985; Vangnai, 1986; cit. por Bhumibhamon et al.) (*²).

Otros autores afirman que el proceso de compostaje requiere, por lo general, un período de tiempo de 3 meses, pero esto puede variar desde 1,5 a 12 meses dependiendo de la estación del año y de la demanda de compost (Campbell et al., 1991).

2.3.7. Determinación de la madurez del compost

Según Dalzell et al. (1991), la utilización que se haga del compost determinará el grado de madurez requerido y, en consecuencia, la duración del proceso de compostaje. Por ejemplo cuando se aplique al momento de siembra de cultivos anuales, el grado de madurez del compost debe ser alto y no deben generarse ácidos o amoníaco. Para protección alrededor de árboles y arbustos ya establecidos y entre hileras de los cultivos en crecimiento, es adecuado un compost relativamente inmaduro. Este continuará degradándose en superficie y será incorporado a la tierra por los pequeños animales del suelo como las hormigas, termitas y gusanos.

Un compost inmaduro puede emitir malos olores y contaminar el ambiente con amonio, otros nutrientes y compuestos orgánicos. Numerosos tests han sido usados para determinar la maduración de un compost, pero no es fácilmente determinable mediante uno sólo de ellos (Mathur et al., 1993).

(*²) BHUMIBHAMON, O., CHAIYAPOL, K. y SIRISANSANEYAKUL, S. s.f. Studies on chemical and environmental changes during composting. Kasetsart University. Bangkok.

Según Mustin (1987), luego que la fase termófila termina el compost obtuvo estabilidad y entra en una fase donde las reacciones de producción de humus (humificación) son predominantes. En esa fase de maduración, el compost continuará evolucionando pero más lentamente.

El compost inmaduro, en el estado de prehumificación, es muy fitotóxico y si se utiliza directamente sobre los cultivos libera en el medio amoníaco y compuestos orgánicos transitorios, tóxicos para las plantas (Mustin, 1987). Ninguna estrategia ha logrado eliminar los problemas de fitotoxicidad de los compost inmaduros. Una combinación de varios compuestos son responsables de dicha toxicidad (Mathur et al., 1993).

Generalmente el compost maduro tiene una relación C/N menor, mayor contenido de humus y mayor capacidad de intercambio catiónico que el compost inmaduro (Díaz et al., 1998).

En cuanto a la determinación de la madurez del compost, cada autor menciona diferentes métodos o criterios para determinarla. Por lo tanto, se presenta a continuación un resumen de las consideraciones que cada uno de ellos realiza, sus coincidencias y sus desacuerdos.

Según Mustin (1987), los principales métodos de estimación de la madurez de un compost se pueden clasificar en métodos empíricos, métodos físicos, métodos químicos y tests biológicos. Dentro de los criterios empíricos considera que un producto de origen y edad conocidos, de color muy oscuro, olor agradable y en el que no se identifica el material original, será seguramente un compost maduro. Asimismo, menciona otra aproximación empírica que consiste en asegurar la subida de temperatura luego de una ligera humidificación y una aereación de la masa de compost. La ausencia de todo aumento de temperatura después de esta operación constituye un buen criterio de estabilización del compost. En cuanto a los métodos físicos se basan en el principio que considera que el compost al final de la fermentación tiene una actividad muy reducida y el consumo de oxígeno es muy bajo, lo mismo que la producción de gas carbónico. El inconveniente de estos métodos es que no permiten evaluar posibles efectos fitotóxicos. Existen también diversos métodos químicos. Algunos se basan en la consideración de que un compost maduro es pobre en amoníaco y rico en nitratos. Otros se basan en tests de cromatografía circular sobre papel. La cromatografía es un método de análisis por absorción y migración selectiva de diversos compuestos químicos de una solución. Esas propiedades de los compuestos son utilizadas para determinar la madurez de un compost, interpretando las formas y colores de las figuras obtenidas en cromatogramas.

Los tests biológicos consisten básicamente en plantas indicadoras o plantas testigo (Kiehl, 1985). La fitotoxicidad del compost puede ser determinada por el porcentaje de germinación y la elongación radicular de pequeñas semillas creciendo sobre el compost en estudio. Otro método biológico considera la medida directa de la biomasa microbiana como indicador de la madurez del compost. La relación entre la biomasa del tipo de microorganismos predominante y la biomasa total determina la madurez (Mathur et al., 1993).

Además de los criterios y métodos anteriormente mencionados, Kiehl (1985) considera una serie de tests rápidos para acompañar el grado de descomposición del compost que pueden ser utilizados a campo. A continuación se sintetizan los mismos:

1. Alteración de las características: reducción de volumen (puede ser hasta un tercio del inicial); coloración y aspecto (oscuro y brillante; el humus tiene coloración negra y debido a la acentuada descomposición la mayor parte de la materia prima original no puede ser identificada); olor (olor a tierra mojada, agradable y tolerable); humedad reducida (la masa pasa a presentarse casi seca).
2. Test de la vara de madera: se introduce una vara de madera en la pila, dejando enterrada permanentemente, removiendo la vara se verifica que esté: fría y mojada (no hay fermentación probablemente por exceso de agua); levemente caliente y seca, con filamentos blancos de micelios de hongos (la pila necesita más agua); caliente, húmeda y manchada de pardo oscuro (condiciones correctas); libre de tierra, con olor agradable, que puede introducirse fácilmente en la pila (compost maduro).
3. Test de temperatura: en la última fase del compostaje la masa adquiere la temperatura ambiente, indicando que el compost está humificado. El descenso final de la temperatura, siempre que las condiciones se mantengan favorables, es considerado como un indicio de que el compost está estabilizado.
4. Test de los coloides: el compostaje hace que la materia orgánica pase de grosera a coloidal. El compost crudo da un líquido con pocas partículas en suspensión y la mayor parte de la muestra en el fondo de la probeta; el compost semi-curado presenta material en suspensión, dando una coloración más oscura que el anterior; el compost humificado dará una verdadera coloración oscura, con líquido sobrenadante rico en humus.

5. Test de la mano: se toma una muestra en la palma de la mano y se junta agua suficiente para formar una pasta, que debe ser trabajada con las puntas de los dedos de la otra mano, amasando. Separando las manos se observa que: si está crudo las manos estarán prácticamente limpias; si está semicurado una pequeña parte de la muestra permanece en las palmas; si está curado las palmas de las manos quedarán cubiertas por una capa oscura.
6. Test del pH: la materia orgánica cruda, de origen vegetal o animal, es naturalmente ácida. El compostaje provoca la elevación del pH.
7. Test para nitrógeno: sirven para indicar la presencia de amonio o de nitrato en el compost. Un compost bien curado tiene nitrato en abundancia y apenas trazos de amonio. En un compost semi-curado existe amonio pero nada de nitrato. Si aparecen nitrato y amonio indica que es una mezcla de compost curado y semi-curado. Si aparecen apenas trazos de nitrato y de amonio, el compost está en la fase intermedia de fermentación en la cual todo el nitrógeno se encuentra bajo forma de proteína (nitrógeno orgánico).
8. Test para almidón: se fundamenta en la existencia de tres tipos de carbohidratos: azúcares, almidón y celulosas. Los azúcares son los primeros compuestos en ser metabolizados, luego los almidones y por último la celulosa. Diferentes polisacáridos dan con el yodo coloraciones características. Una coloración amarilla y con poco precipitado significa que el compost está maduro. Una coloración azul intensa y un fuerte precipitado significa que el compost no está terminado aún.

2.3.8. Producto del compostaje y sus posibles usos

Al final de la etapa de descomposición el producto que queda en la pila de compost consiste de:

- las partes más resistentes de los desechos originales, particularmente la lignina o materiales leñosos;
- productos intermedios formados durante el proceso;
- microorganismos muertos;
- humus, el material complejo y estable formado por interacciones químicas complicadas entre los materiales;
- microorganismos vivos y pequeños animales del suelo;
- materia mineral (ceniza) traída con los desechos orgánicos originales en forma de suelo sobre las raíces de las plantas o basura;

- agua todavía presente, principalmente absorbida por la materia orgánica.

Un compost razonablemente maduro es un material migajoso marrón-negro. Al menos 80% pasa a través de una malla con orificios de 5mm de diámetro cuando se elabora a partir de residuos agrícolas. Se pueden reconocer algunos pequeños restos de aspecto pajizo o de tallo, por lo demás, no puede ser distinguido el carácter de los residuos originales. Tiene olor a tierra (Dalzell et al., 1991).

A continuación se presenta un cuadro con los rangos de composición química de compost maduros, en función del material original.

Cuadro Nº 6 - Composición química de compost maduros.

Sustancia	Rango de composición % peso sobre peso seco		
Materia orgánica	25,0	a	80,0
Carbono	8,0	a	50,0
Nitrógeno	0,4	a	3,5
Fósforo	0,1	a	0,6
Potasio	0,4	a	0,6
Calcio	6,0	a	1,1
Cenizas	75,0	a	20,0
	Compost municipal		Compost agrícola

Fuente: Dalzell et al., 1991.

Luego de ser compostado, afirma Campbell et al. (1991), el material es zarandeado para separar los diferentes tamaño de partículas. Por ejemplo Grimm's utiliza una zaranda de 0,5 pulgadas. Aproximadamente el 35 a 40% del material compostado está pasado de tamaño y es reciclado a la pila para un nuevo compostaje. Este material reciclado es mezclado con desechos frescos, sirviendo de inóculo para el proceso de compostaje de los mismos.

Los beneficios del compostaje de cualquier material orgánico son:

- a) reducción de la relación C/N por el desdoblamiento de la celulosa, lo que minimiza la competencia entre la planta y los microorganismos (Van Schoor et al., 1988);

- b) efectiva pasteurización por las relativamente altas temperaturas, matando patógenos potenciales (Pokorny, 1979 cit. por Van Schoor et al., 1988);
- c) incremento de la CIC, alta capacidad de retención de agua, mejor textura, muerte de semillas de malezas y aumento del pH (Yazaky y Nichols, 1978 cit. por Van Schoor et al., 1988);
- d) se obtiene un medio con un contenido balanceado de nutrientes potencialmente disponibles para las plantas (Van Schoor et al., 1988).

En cuanto a lo usos, es importante mencionar que el compostaje ofrece un medio de procesar una amplia gama de desechos orgánicos para formar humus que es la forma más estable de la materia orgánica del suelo y la más adecuada para su incorporación al suelo (Dalzell et al., 1991).

El compost zarandeado puede ser comercializado como está o mezclado con tierra o corteza para utilizarse en una gran variedad de productos. Puede ser vendido a empresas de espacios verdes, viveros y particulares, así como a jardineros para su uso como cobertura. Los productos son vendidos como sustitutos de turba, se utilizan como compost para cultivo de hongos y como polvo de corteza para mezclas o cobertura de suelo o como componentes para macetas. El compost incrementa la aereación, la capacidad de retención de agua y la infiltración y descende el encostrado de la superficie. Es por esta razón que este producto se utiliza también en el control de la erosión (Campbell et al., 1991). Las cortezas compostadas están dedicadas al uso como sustratos en invernaderos para especies forestales (Guedes de Carvalho et al., 1990).

El compostaje es una alternativa promisoría para la industria de productos forestales ya que permite reducir el volumen de desechos y se produce un material con valor económico para aplicaciones hortícolas o agrícolas (Campbell et al., 1991).

2.3.9. Experiencias de compostaje de residuos forestales en Uruguay

Curbelo et al. (1996) realizaron una encuesta a nivel nacional sobre experiencias concretas de compostaje considerando, básicamente, la materia prima utilizada (especie y tamaño de partícula), el tamaño promedio de las pilas, los activadores incorporados en cada caso, el control de la humedad y temperatura durante el proceso, el pH del compost maduro, la duración del proceso y los usos que le dan al producto final.

A continuación se presenta una síntesis de las mismas.

Empresa FA.NA.PEL.

Materia prima:	Corteza de <i>Eucalyptus</i>
Tamaño de partícula inicial:	Chips de 1,5 a 2,5 cm.
Tamaño de las pilas:	1 m de ancho x 1 m altura y largo variable.
Agregado de activadores:	Urea: 6 - 8 kg/m ³
Control de humedad:	La mantienen a capacidad de campo.
Control de temperatura:	Usan este parámetro para determinar el momento de dar vuelta las pilas. Cuando llegan a 70-80°C se dan vuelta. En el total del proceso las pilas se dan vuelta 3 veces.
Fin del proceso:	Cuando la temperatura se estabiliza en 30-32°C dan por terminado el proceso.
pH compost maduro:	6,5
Usos del compost	Producción de plantas. Obtienen rendimientos aceptables.

Empresa EUFORES

Materia prima:	Corteza de pino
Tamaño de partícula inicial:	Chips de 0,5 a 1 cm.
Tamaño de las pilas:	4 m de ancho x 1 m altura y 20 m de largo.
Agregado de activadores:	Urea: 8 kg urea + 2 - 4 kg de melaza/m ³ en 200 litros de agua.
Control de humedad:	La mantienen a capacidad de campo.

Control de temperatura:	Usan este parámetro para determinar el momento de dar vuelta las pilas y la madurez del compost. Cuando llegan a 70-75°C se dan vuelta. En el total del proceso las pilas se dan vuelta de 2 a 3 veces.
Fin del proceso:	Cuando la temperatura se estabiliza en 25-30°C dan por terminado el proceso.
Usos del compost:	Producción de plantas que presentan buen comportamiento en vivero en cuanto al desarrollo radicular.
Problemas:	Si el material a compostar tiene baja humedad se dificulta el proceso. En la producción de verano-otoño, la baja retención de agua del compost lo que exige agregar materiales que la beneficien como vermiculita.

Empresa FORESTAL ORIENTAL

Materia prima:	Corteza de pino
Tamaño de partícula inicial:	Chips de 0,7 a 1,2 cm.
Tamaño de las pilas:	3,5-4,5 m de ancho x 2-3 m altura y largo variable.
Agregado de activadores:	Urea: 1 kg/m ³ cada vez que se invierten las pilas.
Control de humedad:	Mantienen las pilas saturadas de agua.
Control de temperatura:	Usan este parámetro para controlar el proceso. Se mantiene en un rango de 65-75°C. En el total del proceso las pilas se dan vuelta 3 a 4 veces.
Fin del proceso:	Cuando la temperatura se estabiliza en 30°C dan por terminado el proceso.

pH compost maduro:	6,5 promedio
Usos del compost:	Producción de plantas que presentan un satisfactorio desarrollo con buen sistema radicular.

Aserradero Aral S.A.

Esta experiencia fue realizada por Curbelo et al. en 1996 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Materia prima:	Despunte, corteza y aserrín de pino.
Tamaño de partícula inicial:	1,7 x 0,6 x 1,5 cm.
Tamaño de las pilas:	2,2 m de ancho x 1,5 m altura x 2,2 m de largo.
Agregado de activadores:	Agua con Urea: 6,6 kg/m ³
Control de humedad:	Se mantuvo en 60%.
Control de temperatura:	Se usó este parámetro para determinar el momento de dar vuelta las pilas. No se alcanzaron valores de temperatura mayores a 44°C. Se invirtieron las pilas 3 veces durante el proceso.
Fin del proceso:	Cuando la temperatura se estabiliza, alcanzando valores similares a los del ambiente.
pH compost maduro	6,1

2.4. SUSTRATOS PARA VIVEROS FORESTALES

Como ya fue analizado anteriormente, surge como uno de los destinos más promisorios del compost su uso como sustrato en viveros forestales.

El término sustrato en agricultura se aplica a todo aquel material, natural o artificial, puro o en mezcla, que permite el desarrollo del sistema radicular y cumple también un rol de soporte. Ciertos sustratos enriquecidos contribuyen también a la alimentación de la planta (Moinereau et al., 1987).

Los sustratos, según Serrada Hierro (1993) cit. por Palotti y Vola (1994), deben:

- servir de soporte a la planta por medio de su fase sólida;
- ser capaces de constituir una reserva de agua, con los nutrientes necesarios para la planta;
- conservar un espacio de macroporos que almacene aire para la respiración y el crecimiento de las raíces;
- constituir un ambiente favorable para el desarrollo de organismos simbiotes con las raíces de las plantas.

Como asiento del desarrollo de las raíces, el sustrato debe presentar características compatibles con su actividad metabólica. Entran así en juego los procesos respiratorios que implican la presencia en el medio de una fase gaseosa fácilmente renovable. Su volumen y la rapidez de intercambio con la atmósfera dependen de la estructura física del sustrato. Esa misma estructura le confiere capacidad de retener agua que constituye un parámetro importante para la posterior conducción de los riegos (Moinereau et al., 1987).

Propiedades físicas: intervienen en el funcionamiento del vegetal por intermedio de la retención de soluciones nutritivas y la aereación de las raíces (Gras, 1987). Dentro de ellas son importantes la textura y la estructura, por su acción sobre la aereación y la retención de agua (Simoes et al., 1970 cit. por Palotti y Vola., 1994).

La porosidad recomendada para los sustratos está por encima del 80% de su volumen total (Serrada Hierro, 1993 cit. por Palotti y Vola, 1994). Una mezcla ideal para las plantas debe reunir un balance entre buen drenaje, adecuado número de poros de aereación y una suficiente capacidad de retención de agua (Van Schoor et al., 1988).

Si un sustrato tiene baja porosidad, los poros son tapados habitualmente por agua y es común el crecimiento de algas. Si hay entre un 10 y 15% de poros ocupados por aire, estos sustratos tienen pocos requerimientos de riego, se desarrollan plantines más fuertes aunque pueden ocurrir problemas sanitarios de *Dumping-off*. Lo ideal es que el sustrato presente entre 15 y 25% de poros ocupados por aire ya que requiere riego poco frecuente y permite un buen crecimiento de las plantas. Si el sustrato tiene más de 25% de poros de aereación, entonces los requerimientos de riego serán mayores a pesar de permitir un buen desarrollo de las plantas (Van Schoor et al., 1988).

En el cuadro siguiente se demuestra la influencia de la dimensión de partícula en la porosidad y retención de agua para coníferas.

Cuadro N° 7 - Influencia de la dimensión de partícula en la porosidad y retención de agua.

Dimensión de partículas	Porosidad total (%)	Agua retenida (%)
0 - 1 mm	66,4	52,2
1 - 1,25 mm	78,3	28,5
2,5 - 4 mm	83,3	18,6
4 - 8 mm	85,4	17,5
8 - 10 mm	86,7	18,5
> 10 mm	86,7	19,4

Fuente: Gras, 1987.

En la fracción más fina la porosidad total disminuye por la presencia de partículas más pequeñas. En cuanto a la retención de agua, es mayor en las fracciones finas, lo que se explica por un aumento de la microporosidad (Gras, 1987).

Propiedades químicas: pueden mencionarse el pH, la relación C/N y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). El pH afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La relación C/N influye en la nutrición (valores altos supone un alto consumo de nitrógeno para descomponer el carbono) y en la estabilidad del sustrato (valores altos hacen al sustrato menos estable, no admitiéndose valores más altos a 20/1). La CIC regula el flujo de nutrientes entre la planta y la solución (Serrada Hierro, 1993 cit. por Palotti y Vola, 1994).

Propiedades biológicas: tienen importancia debido al peligro de ocurrencia de enfermedades y competencia de malezas. Es importante usar sustratos lo más inertes posibles (como el compost de corteza de pino) o realizar una buena esterilización del mismo (García de León, 1993 cit. por Palotti y Vola, 1994).

2.4.1. Tipos de sustratos

Los sustratos pueden clasificarse según su actividad química en inertes (arena, grava, roca volcánica, arcilla expandida, etc.) y activos (turberas rubias y negras, corteza de pino triturada, vermiculita, materiales lignocelulósicos, etc.) (Abad, 1991 cit. por Palotti y Vola, 1994).

Según Moinereau et al. (1987), dentro de los sustratos considerados químicamente activos se encuentran, entre otros, los siguientes:

- a) Las turberas: son materiales de origen vegetal, esencialmente orgánicos, más o menos humificados, con poca o muy poca contaminación mineral (menos de 10%).
- b) Las cortezas: pueden ser utilizadas en estado fresco, después de molidas o calibradas (fracciones inferiores a 20 mm) o compostadas con turberas de otros subproductos de la industria (aserrín, residuos de la pasta de papel, etc.).
- c) Los residuos lignocelulósicos: la mayor parte de este material debe ser compostado y desinfectado antes de su utilización. Como para las cortezas, el compostaje tendrá el efecto de estabilizar y homogeneizar el producto. Los desechos lignocelulósicos tienen débil densidad aparente y una porosidad elevada en el estado fresco. También tienen débil retención de agua. La misma puede aumentar considerablemente después de la descomposición.

2.4.2. Sustratos utilizados en viveros forestales en Uruguay

La situación particular de los viveros forestales en el país en relación al sustrato que utilizan para la producción de plantas se sintetiza a continuación (*¹):

La empresa Forestal Oriental utiliza como sustrato el producto del compostaje controlado de corteza de pino molida con el agregado de urea a razón de 1 kg/m³. La corteza la compran a la empresa PAMER (Papelería Mercedes). Estiman la reducción del volumen de las pilas, como resultado de la descomposición del material original, en un 50%. Utilizan como envase para las plantas bandejas de 104 celdas (50 cc cada una) y producen anualmente 6:000.000 de plantas.

(*¹) Irisity, F., 2000. com. pers.

En el vivero de la Caja Bancaria utilizan como sustrato el producto del compostaje de corteza de pino mezclado con mantillo de bosque de pino.

La empresa Eufores terceriza la producción del sustrato. La materia prima y los materiales los proporciona la empresa y un tercero se ocupa de la elaboración. La empresa luego compra a esta persona el sustrato ya elaborado. Para el compostaje utilizan corteza de pino que compran a la empresa PAMER. Su producción anual de plantas es de 4:000.000, utilizando envases de 100 cc.

El vivero San Felipe y Santiago (Tacuarembó) y el de la empresa Colombade utilizan como sustrato corteza de pino ya compostada que compran en Misiones (Argentina). Este último estima su producción de plantas en aproximadamente 6:000.000 por año, utilizando para este propósito envases de 90 cc.

La empresa Cofusa compra, para su producción de plantas en vivero, sustrato comercial Eucatex. En el mismo se producen 2:000.000 de plantas por año y utilizan para ello envases de 70-80 cc.

Otros viveros más pequeños como Diano, Filliat y Soust utilizan también para su producción de plantines sustrato comercial (Eucatex).

En base a estos datos se observa que muchas de las empresas forestales de nuestro país utilizan el compostaje como medio de obtención de un producto estable, que puede ser utilizado como sustrato para la producción de plantas. La mezcla que se usa más habitualmente es corteza de pino y urea. A su vez, la mayoría sostiene que las plantas presentan buen comportamiento, obteniéndose rendimientos aceptables. De aquí surge el interés del vivero en que se desarrolla el presente trabajo de evaluar si el compostaje de corteza de pino es o no una alternativa viable para su situación particular.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. INSTALACION DEL ENSAYO

3.1.1. Localización

El trabajo se realizó en el vivero del Ing. Agr. Bruno Bianchi, ubicado sobre la ruta nacional Nº 14, en la ciudad de Mercedes (Departamento Soriano).

3.1.2. Sustrato

Como material a compostar se utilizó corteza de pino (mezcla de *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) comprada a la empresa PAMER (Papelera Mercedes), residuo de sus procesos industriales.

Dicha corteza fue preparada previamente a su utilización, pasándola por un molino de martillo para obtener un tamaño promedio de partícula dentro de las dimensiones recomendables.

Se partió, entonces, de chips de corteza de pino cuyas dimensiones promedio fueron 2 x 2,5 x 0,7 cm.

3.1.3. Tratamientos

Se llevaron a cabo tres tratamientos diferentes. En cada uno de ellos se incorporó al residuo forestal (corteza de pino) una fuente de inóculo y nitrógeno distinta.

Como fuente de inóculo y nitrógeno se seleccionaron materiales que cumplieran con los siguientes requisitos:

1. tener una relación C/N baja que permita corregir la relación C/N de la corteza de pino (cuando se desea compostar materiales con alta relación C/N conviene mezclarlos con materiales de baja relación para acelerar y hacer más eficiente el proceso de descomposición);
2. aportar una fuente de nitrógeno para los microorganismos responsables de la descomposición del material (necesitan nutrientes para su actividad metabólica);

3. ser fuente de inóculo;
4. ser fáciles de conseguir por el productor.

Dichos tratamientos fueron:

- *Tratamiento 1:*
Corteza de pino (10 m³) + estiércol vacuno fresco (20%)
- *Tratamiento 2:*
Corteza de pino (10 m³) + urea (5 kg/m³)
- *Tratamiento 3:*
Corteza de pino (10 m³) + gallinaza (20%)

3.1.4. Instalación de las pilas

Para cada uno de los tratamientos se instaló una pila en el predio del vivero. Esta actividad fue realizada el 10 de julio de 1999.

La dimensión original de las tres pilas fue de 4,0 m de largo, 2,0 m de ancho y 1,25 m de altura.

Las pilas se instalaron sobre el suelo, formando capas alternadas de corteza de pino y de la fuente de nitrógeno e inóculo correspondiente para cada caso. Se fueron regando las pilas continuamente a medida que se agregaban las distintas capas de material para alcanzar el contenido de humedad necesario para el proceso (50-60%).

Luego de instaladas fueron cubiertas con nylon transparente para mantener un contenido de humedad adecuado y evitar pérdidas de calor, favoreciendo así el aumento de la temperatura. Dicha cobertura se mantuvo durante los primeros días, eliminándose luego.

3.2. SEGUIMIENTO DEL ENSAYO

3.2.1. Relación C/N de los tratamientos

La relación C/N de cada uno de los tratamientos fue determinada en dos ocasiones, al comienzo y al finalizar el ensayo.

Al inicio del ensayo por la importancia de conocer y corregir la relación y al final para saber a qué relación se llegó y así determinar el grado de madurez del compost.

El primer análisis fue realizado por la empresa Agrolab y el segundo por la División Suelos y Aguas del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).

3.2.2. pH de los tratamientos

El pH de los distintos tratamientos fue determinado también al iniciar y finalizar el ensayo, para evaluar su variación como consecuencia del proceso.

3.2.3. Temperatura de las pilas

Durante todo el ensayo, la temperatura de las pilas se registró diariamente mediante un termómetro de 50 cm de largo.

Las medidas se hicieron siempre en el mismo lugar de la pila y a la misma profundidad.

3.2.4. Humedad de las pilas

En cuanto a la humedad de las pilas, trató de mantenerse durante todo el ensayo dentro de los parámetros considerados óptimos (50-60%). Es así que se incorporó agua siempre que los niveles fueron inferiores a los mencionados.

3.2.5. Aereación de las pilas

Durante el ensayo se aerearon las pilas de acuerdo a sus variaciones de temperatura, teniendo en cuenta los picos máximos.

En este caso en particular, se realizaron en total dos aereaciones a cada una de las pilas. Esta actividad fue llevada a cabo manualmente, haciendo que las capas externas y más secas pasaran a ocupar la parte interna de la pila y las capas internas, más húmedas y calientes pasaran a ocupar la parte externa.

3.2.6. Tests de germinación

Se realizaron ensayos de germinación de semillas para detectar la presencia de sustancias fitotóxicas que inhibieran la germinación y como indicador del grado de madurez de los diferentes sustratos.

Se utilizaron semillas de dos especies diferentes, *Eucalyptus grandis* y *Lactuca sativa* (lechuga). *Lactuca sativa* fue utilizada por su alta sensibilidad a la presencia de amonio y su necesidad de nitratos para germinar y *Eucalyptus* para corroborar la ausencia de efectos negativos en la germinación de semillas forestales que serán posteriormente usadas en el vivero para la producción de plantas.

Para el ensayo se extrajeron muestras de cuatro puntos de cada pila de compost (utilizando como referencia los puntos cardinales) que se mezclaron formando una única muestra representativa. A esta muestra se le denomina muestra compuesta. De cada muestra compuesta se colocaron 30 grs. en placas de Petri. Para *Lactuca sativa* se sembraron 0,2 gr. de semilla que fueron regadas y colocadas a 25°C en presencia de luz. Para *Eucalyptus grandis* se sembraron 0,1 gr. de semilla que también fueron regadas y colocadas en incubadora a 25°C y en ausencia de luz. Como testigo se sembraron semillas de ambas especies en agua. Se realizaron, tanto para *Lactuca* como para *Eucalyptus*, 4 repeticiones de cada uno de los tratamientos analizados y cuatro repeticiones del testigo, totalizando 32 placas por ensayo.

La evaluación de la cantidad de semillas germinadas y no germinadas se realizó, en todos los casos, dentro de los siete días posteriores a su instalación.

Los ensayos se efectuaron a los 3, 5 y 7 meses de iniciado el proceso de compostaje.

3.2.7. Determinación granulométrica

Otro de los factores evaluados durante el proceso fue la evolución de las distintas fracciones granulométricas del material en descomposición a medida que se avanzaba en el tiempo. Por esta razón se realizaron determinaciones granulométricas a los 3, 5, 7 y 10 meses de instalado el ensayo.

La granulometría fue evaluada en la Cátedra de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería. Los tamices utilizados fueron ASTM E.11 de 50 mm, 25 mm, 9,5 mm, 6,3 mm y 4,75 mm de abertura.

La idea fue utilizar una variedad tal de tamices que permitiera separar las muestras en por lo menos cinco tamaños de partícula distintos. A su vez, los tamices más pequeños debían ser representativos del tamaño de partícula que se considera comercialmente útil.

La muestra compuesta de cada tratamiento fue secada en estufa a 50°C durante 2 días. Luego se determinó su peso total. Posteriormente se pasó el material por los diferentes tamices (siempre empezando por el de mayor tamaño) quedando en cada caso retenido el material con mayor tamaño que la abertura del tamiz y pasando el material más fino. Finalmente se pesó el material retenido por cada tamiz, separándose en fracciones de distintos tamaños y se determinó el porcentaje de cada fracción con respecto al peso total.

3.2.8. Evaluación agronómica

A los 10 meses de proceso, se evaluó la capacidad de germinación y desarrollo de *Eucalyptus grandis* en condiciones de vivero.

Esta evaluación consistió en la instalación de 2 bandejas para cada uno de los sustratos y 2 bandejas testigo (Eucatex + vermiculita que es lo que se usa actualmente en el vivero).

Antes de llenar las bandejas se pasaron los sustratos por tamiz de 5 mm de manera de lograr un tamaño adecuado de partícula. Luego se procedió al llenado de las bandejas y a la siembra de las semillas de *Eucalyptus grandis*. Posteriormente se regaron y se colocaron las bandejas unas encima de otras, tapadas con nylon negro hasta su germinación.

En todos los casos se respetaron las prácticas habituales del vivero, siguiendo las indicaciones del personal que trabaja en el lugar.

Se determinó el tiempo transcurrido entre la siembra y el comienzo de la germinación para cada uno de los tratamientos y para el testigo.

A los 18 días de la siembra se realizó un primer conteo y a los 27 días un segundo conteo de la cantidad de celdas con semillas germinadas por cada bandeja y se determinó el promedio para cada tratamiento.

3.2.9. Análisis de retención de agua

Se realizó un análisis para determinar la capacidad de retención de agua de los sustratos obtenidos a los 10 meses de proceso.

Se utilizaron muestras tamizadas (tamiz de 5 mm) de cada uno de los sustratos y se siguió el procedimiento Kiehl (1985):

- Perforar el fondo de un recipiente con agujeros.
- Pesarse dicho recipiente vacío (p) y llenarlo del material a analizar.
- Posteriormente llenarlo de agua y dejar escurrir el exceso.
- Pesarse nuevamente el recipiente (p_1).
- Secar en estufa.
- Volver a pesar el recipiente (p_2).

Se realizaron tres repeticiones para cada uno de los sustratos.

La capacidad de retención de agua se determinó luego con la siguiente fórmula:

$$\text{CRA \%} = (p_1 - p_2 / p_2 - p) \times 100$$

Se evaluó también la capacidad de retención de agua del sustrato comercial utilizado en el vivero (Eucatex) mediante el mismo procedimiento.

3.2.10. Evaluación de costos

Esta evaluación se divide en dos partes bien diferenciadas. La primera considera, por un lado, los costos asociados al sustrato comercial que el vivero utiliza actualmente (Eucatex) y, por otro lado, los costos asociados a los tres sustratos obtenidos como producto del proceso de compostaje. Este análisis permitirá realizar una primera comparación de costos.

La segunda parte relaciona el rendimiento de las pilas de compost con las necesidades de sustrato del vivero en función de su producción anual de plantas, analizando los costos, tanto del Eucatex como de los sustratos estudiados, para esa situación de producción en particular.

3.2.11. Otros datos considerados en el estudio

Se obtuvieron de la Dirección Nacional de Meteorología los registros diarios de temperatura máxima, mínima y media durante el período julio de 1999 a febrero de 2000 y los registros de precipitaciones durante el mismo período, referidos a la ciudad de Mercedes (Departamento Soriano).

En Anexo N° 1 se presenta el calendario de las actividades de seguimiento realizadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. INSTALACION DE LAS PILAS

En las figuras N° 3 y 4 pueden observarse las pilas al momento de su instalación en el vivero. Las mismas tienen forma aproximadamente trapezoidal y se instalaron de manera de dejar entre ellas espacio suficiente como para realizar cómodamente la actividad de aereación.

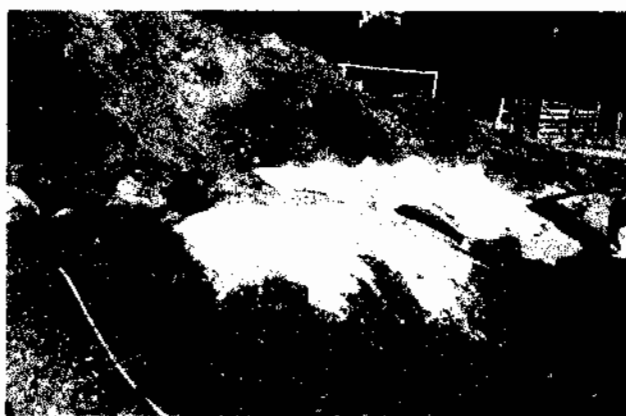


Figura N° 3 - Proceso de instalación de la pila del tratamiento 3.

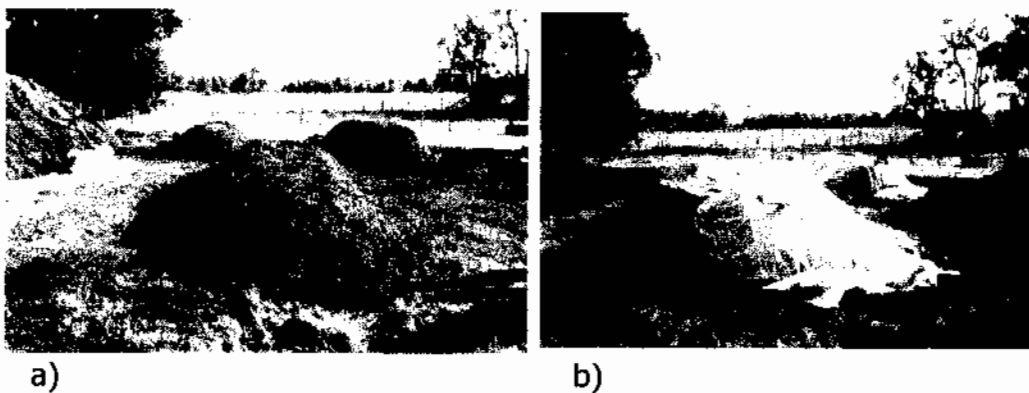


Figura N° 4 - Pilas ya instaladas. a) Adelante: pila del tratamiento 2; atrás a la derecha: pila del tratamiento 1 y atrás a la izquierda: pila del tratamiento 3 (dimensiones: 2 m ancho x 4 m largo x 1.25 m altura). b) Pilas tapadas con nylon.

4.2. DIMENSION DE LOS CHIPS DE CORTEZA DE PINO

En cuanto a la dimensión de los chips de corteza puede observarse, en la figura N° 5, el tamaño inicial promedio de los mismos.

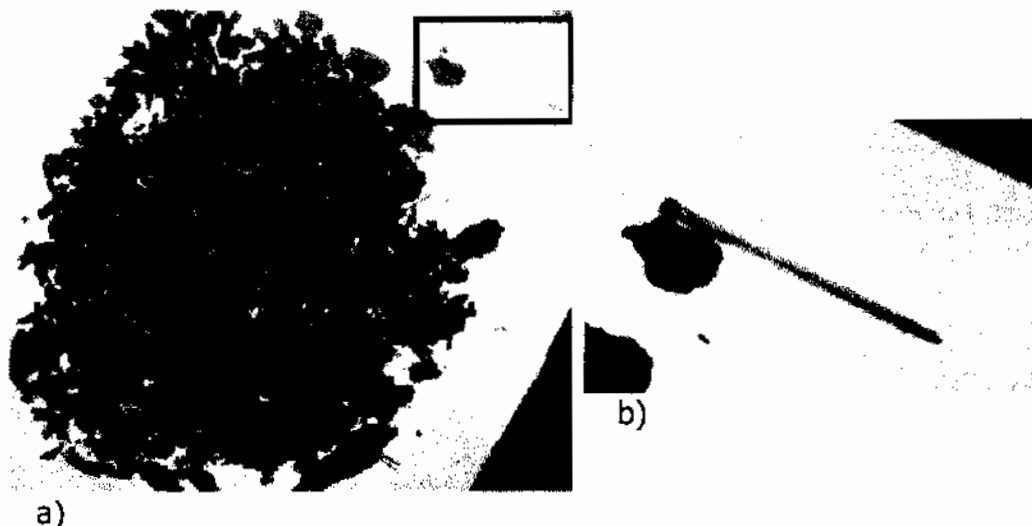


Figura N° 5 - Dimensión de partículas de corteza al inicio del proceso. a) Muestra de partículas de corteza de pino. b) Partícula de tamaño promedio (2 x 2,5 x 0,7 cm). Ampliación del recuadro de la foto 3a.

La dimensión de las partículas es una característica importante a ser considerada ya que afecta el buen desarrollo del proceso de compostaje. La descomposición es un fenómeno microbiológico cuya intensidad está ligada a la superficie expuesta del material, es decir que cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor es su superficie de exposición y más rápida será su descomposición (Kiehl, 1985).

No debe perderse de vista, sin embargo, el hecho de que partículas excesivamente pequeñas pueden afectar la circulación de aire en la pila y crear condiciones anaeróbicas no deseables.

Según Van Schoor et al. (1988) el tamaño ideal de partícula varía entre 2,5 a 5 cm. Si se considera este valor como referencia, el tamaño de partícula utilizado para el ensayo fue adecuado (2 x 2,5 x 0,7 cm). Asimismo, se entendió que con ese tamaño promedio de partícula se lograba mantener en las pilas un adecuado espacio poroso y, por lo tanto, una adecuada circulación de aire, favoreciendo las condiciones de aerobiosis imprescindibles para que el proceso de compostaje sea eficiente.

Sin embargo, las experiencias en nuestro país indican que la mayoría de los productores de compost en base a residuos forestales parten de un tamaño promedio de partícula entre 0,5 y 1,5 cm (Curbelo et al., 1996).

Para verificar la efectiva descomposición del material, se realizaron evaluaciones granulométricas de los tratamientos. Los resultados se presentan en anexo N° 2 (cuadros N° 18, 19 y 20).

En la tabla siguiente se puede observar claramente la variación de las diferentes fracciones granulométricas para cada uno de los tratamientos.

Cuadro N° 8 - Variación de las diferentes fracciones granulométricas de los tres tratamientos.

Tratamiento 1				
Fración granulométrica	3 meses	5 meses	7 meses	10 meses
> 9,5 mm	46,96%	42,80%	46,05%	30,36%
6,3 - 9,5 mm	14,69%	18,16%	14,62%	18,74%
< 6,3 mm	37,70%	38,44%	38,83%	50,90%

Tratamiento 2				
Fración granulométrica	3 meses	5 meses	7 meses	10 meses
> 9,5 mm	54,85%	49,38%	43,61%	31,52%
6,3 - 9,5 mm	17,09%	18,90%	18,30%	19,50%
< 6,3 mm	27,41%	31,22%	37,63%	48,98%

Tratamiento 3				
Fración granulométrica	3 meses	5 meses	7 meses	10 meses
> 9,5 mm	48,14%	47,82%	34,49%	28,80%
6,3 - 9,5 mm	16,69%	14,43%	15,75%	13,70%
< 6,3 mm	33,88%	37,24%	49,03%	57,50%

Durante el proceso, la fracción granulométrica > 9,5 mm disminuyó un 35,5% para el tratamiento 1; 42,5% para el tratamiento 2 y 40,2% para el tratamiento 3; la fracción comprendida entre 6,3 y 9,5 mm varió poco en los tres tratamientos y la fracción < 6,3 mm aumentó un 35% para el tratamiento 1; 78% para el tratamiento 2 y 70% para el tratamiento 3. Estos valores demuestran que el material efectivamente se fue descomponiendo a lo largo del proceso de compostaje.

En el caso del tratamiento 1 la mayor variación en los porcentajes de las diferentes fracciones se da entre el 7° y 10° mes, mientras que en los otros dos tratamientos la variación es constante durante todo el proceso.

Si se tiene en cuenta la fracción granulométrica $< 6,3$ mm (fracción comercialmente útil) queda claro que para los tratamientos 1 y 2 aproximadamente la mitad del material compostado alcanzó esas dimensiones y para el tratamiento 3 aproximadamente un 60%.

En la figura N° 6 puede observarse la variación de la fracción $< 6,3$ mm en el tiempo, para los distintos tratamientos.

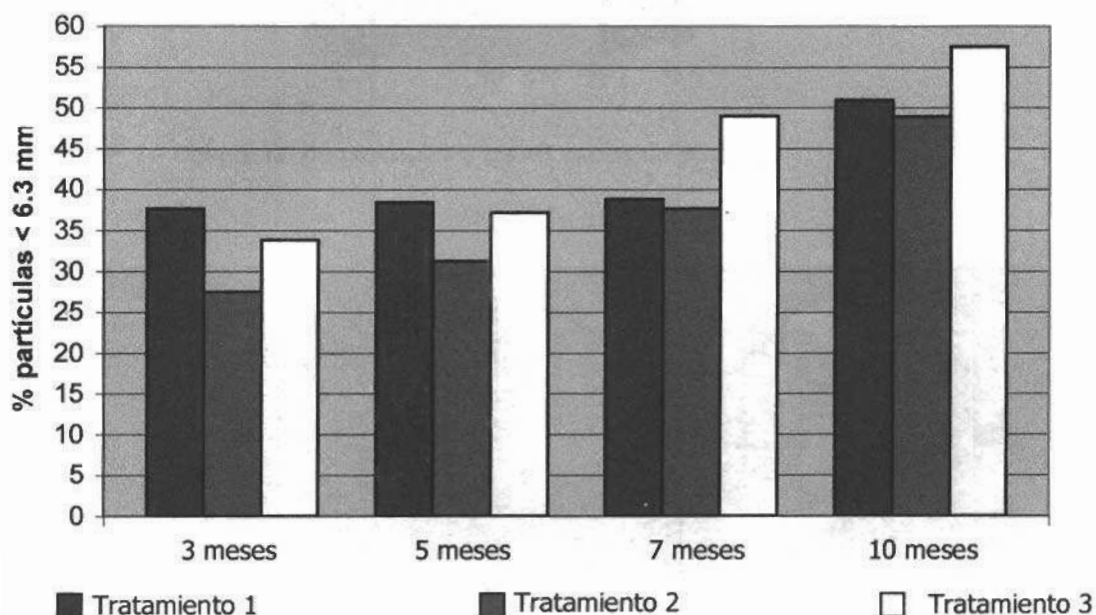


Figura N° 6 - Variación del porcentaje de partículas $< 6,3$ mm durante el proceso de compostaje. Comparación entre tratamientos.

Cabe mencionar que estos datos no significan que el material que aún no ha alcanzado ese tamaño de partícula ($< 6,3$ mm) sea material desaprovechado, sino que es material que necesita más tiempo para ser descompuesto. La mayor cantidad del material utilizado llegará, más o menos rápidamente, a un tamaño comercialmente útil.

En las figuras N° 7, 8 y 9 puede observarse el tamaño promedio de las partículas a los 10 meses de proceso, los tamices utilizados para la evaluación granulométrica y el tamaño promedio de las partículas una vez tamizadas y listas para ser usadas en bandejas.

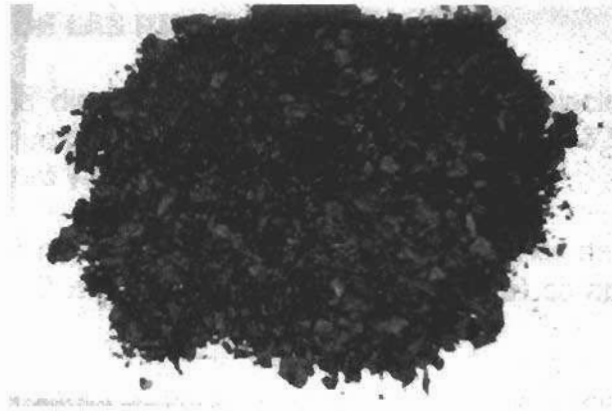


Figura N° 7 - Dimensión de partículas a los 10 meses de proceso.

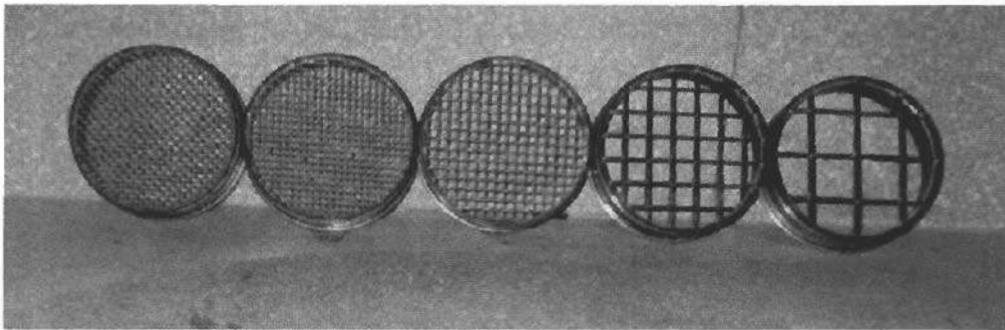


Figura N° 8 - Tamices utilizados para las ensayos granulométricos realizados (de derecha a izquierda: 50, 25, 9,5, 6,3 y 4,75 mm de abertura).

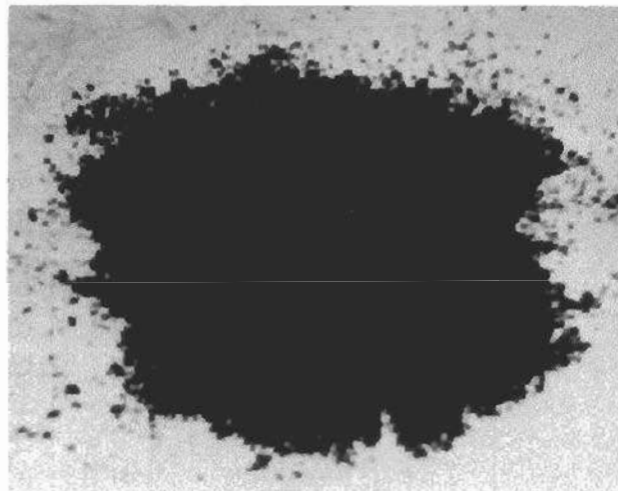


Figura N° 9 - Tamaño de partícula de muestra tamizada (tamiz 5 mm).

4.3. DIMENSION DE LAS PILAS

En cuanto a la dimensión de las pilas, trabajos relacionados con el tema coinciden en que inicialmente deberían tener de 2,5 a 3,5 m de largo, de 1,5 a 1,8 m de altura y ancho variable (no menor a 2 m).

Si se tienen en cuenta estos valores, las dimensiones de las pilas del ensayo (4 m de largo, 2 m de ancho y 1,25 m de altura) se aproximan bastante a ellos.

En cuanto a la altura es importante mencionar que originalmente la idea fue hacer las pilas un poco más altas (1,5 m), pero en la práctica esto resultó imposible ya que los chips de corteza caían permanentemente hacia los costados impidiendo alcanzar una altura mayor.

Al finalizar el ensayo se llegó a las siguientes dimensiones de las pilas:

- *Tratamiento 1:*

largo:	4,0 m
ancho:	2,0 m
altura:	0,7 m
- *Tratamiento 2:*

largo:	4,0 m
ancho:	2,8 m
altura:	0,6 m
- *Tratamiento 3:*

largo:	4,0 m
ancho:	2,0 m
altura:	0,55 m

Esto determina que los volúmenes, a los 10 meses de instaladas las pilas, fueron los siguientes:

- *Tratamiento 1:* 5,60 m³
- *Tratamiento 2:* 6,72 m³
- *Tratamiento 3:* 4,40 m³

Considerando el volumen inicial de cada una de las pilas (10 m^3) y los volúmenes finales de las mismas, se puede determinar la disminución en volumen que han sufrido como consecuencia de la degradación de los materiales originales durante el proceso de compostaje.

- *Tratamiento 1:*
volumen inicial = 10 m^3
volumen final = $5,60 \text{ m}^3$
disminución en volumen = $4,40 \text{ m}^3$
disminución en porcentaje = 44%
- *Tratamiento 2:*
volumen inicial = 10 m^3
volumen final = $6,72 \text{ m}^3$
disminución en volumen = $3,28 \text{ m}^3$
disminución en porcentaje = 32,8%
- *Tratamiento 3:*
volumen inicial = 10 m^3
volumen final = $4,40 \text{ m}^3$
disminución en volumen = $5,60 \text{ m}^3$
disminución en porcentaje = 56%

En la figura N° 10 pueden observarse las dimensiones de las pilas a los 10 meses de proceso.



Figura N° 10 - Dimensiones de las pilas a los 10 meses de proceso. A la derecha: pila del tratamiento 1 (2 m ancho x 4 m largo x 0,7 m altura); a la izquierda: pila del tratamiento 3 (2 m de ancho x 4 m largo x 0,55 m altura).

Kiehl (1985) indica que la disminución en el volumen de las pilas puede variar entre un 20 y un 60%. Curbelo et al. (1996), en su trabajo sobre compostaje de residuos forestales, obtienen como resultado una disminución del 40% con respecto al volumen inicial. Tomando esto como referencia, los porcentajes de disminución de los tres tratamientos analizados estarían dentro de los valores teóricamente adecuados. Esto indica que en ellos hubo una buena descomposición del material por parte de los diferentes microorganismos que actúan durante el proceso de compostaje.

La pila del tratamiento 2 es la que menor porcentaje de disminución en volumen ha experimentado durante el proceso (32,8%), seguida por la del tratamiento 1 (44%) y por último la del tratamiento 3 (56%). Esta es la que más se redujo en volumen y, por lo tanto, la que al finalizar el ensayo cuenta con mayor cantidad de partículas más pequeñas (< 6,3 mm).

Si se relacionan los volúmenes finales de las pilas con el porcentaje de la fracción granulométrica < 6,3 mm de cada una a los 10 meses de proceso, se puede determinar con qué volumen comercialmente útil cuenta el vivero. Es así que:

- *Tratamiento 1:*
 volumen final = 5,60 m³
 porcentaje de partículas < 6,3 mm = 50,90%
 volumen de partículas < 6,3 mm = 2,85 m³
- *Tratamiento 2:*
 volumen final = 6,72 m³
 porcentaje de partículas < 6,3 mm = 48,98%
 volumen de partículas < 6,3 mm = 3,29 m³
- *Tratamiento 3:*
 volumen final = 4,40 m³
 porcentaje de partículas < 6,3 mm = 57,50%
 volumen de partículas < 6,3 mm = 2,53 m³

Es decir que el vivero cuenta actualmente con 8,67 m³ de sustrato comercialmente útil.

En los tres tratamientos queda, en mayor o menor grado, material aún por descomponer. A medida que esto suceda, el vivero dispondrá de cantidades superiores de material fino y utilizable como sustrato.

4.4. FUENTE DE NITROGENO E INOCULO UTILIZADA

En cuanto a la disponibilidad de los materiales utilizados en este ensayo, no existen, para la situación de este vivero en particular, limitantes para obtener ninguno de ellos. Los estiércoles, tanto el vacuno como la gallinaza, se consiguen en tambos y gallineros vecinos y la urea se adquiere en cualquier comercio cercano.

El estiércol vacuno tiene generalmente una relación C/N de 20-30/1 y un contenido de nitrógeno de 0,3-1%, mientras que la gallinaza tiene una relación C/N de 10-15/1 y entre 1 y 6% de nitrógeno en su composición (Dalzell et al., 1991). Considerando dichos valores promedio, cualquiera de estos dos materiales cumple con los requerimientos planteados para las fuente de nitrógeno e inóculo seleccionadas.

A su vez, cada uno de ellos tiene su beneficio adicional. El estiércol fresco entra en fermentación rápidamente, ya que las sustancias que sirven de alimento sufren un proceso de digestión química y microbiológica dentro del aparato digestivo del animal. Además es rico en microorganismos (fuente de inóculo) los que, si encuentran condiciones favorables en el medio ambiente, se multiplican prosiguiendo con la descomposición de la materia orgánica. Por su lado, el estiércol de gallina es más rico en nutrientes ya que es más seco, contiene deyecciones sólidas y líquidas mezcladas y provienen de aves criadas, la mayoría de las veces, con raciones concentradas. Comparado con las deyecciones de mamíferos, se verifica que el estiércol de gallina es 2 o 3 veces más concentrado en nutrientes (Kiehl, 1985).

El porcentaje utilizado en los tratamientos (20%) fue determinado en base a la consideración de que sería suficiente para cumplir con todos los requerimientos planteados en cuanto a la fuente de nitrógeno e inóculo a utilizar.

En relación a la urea, la bibliografía menciona que también se pueden utilizar fertilizantes nitrogenados como urea y nitrato amónico para disminuir la relación C/N del material original y aportar el macronutriente a los microorganismos responsables de la descomposición (Dalzell et al., 1991). De hecho es muy común su uso a nivel productivo en nuestro país, siendo la fuente de nitrógeno utilizada por la mayoría de los viveristas que producen compost.

La urea es un producto relativamente barato, fácil de conseguir y muy manipulable, resultando muy sencilla su incorporación a la pila en el momento de la instalación. Los inconvenientes que podría llegar a plantear es una mayor demanda de agua para mantener la humedad en los niveles óptimos y un retraso en el proceso debido a la ausencia de fuente de inóculo inicial. En el caso de una producción continua este dejaría de ser un problema ya que se podría preparar, a partir de una muestra de compost ya maduro y con microorganismos adaptados al proceso, un caldo de cultivo que se incorporaría nuevamente a la pila como fuente de inóculo, evitándose así el inconveniente mencionado.

La cantidad de urea a incorporar (4 kg/m^3) se determinó siguiendo las recomendaciones teóricas y por una cuestión de simplicidad de manejo se decidieron incorporar 50 kg., 25 kg. al inicio y los otros 25 kg. a los tres meses de iniciado el proceso.

4.5. RELACION C/N DE LOS TRATAMIENTOS

Los resultados del análisis realizado al iniciar el ensayo se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro Nº 9 - Relación C/N inicial de los tratamientos.

Tratamiento	% C	% N	Relación C/N
1	27	0,55	49/1
2	42	0,67	63/1
3	42	0,67	63/1
Corteza pino	49	0,28	175/1

Fuente: Agrolab, 1999.

Como puede observarse se parte de un material con una relación C/N muy alta (175/1), característica de residuos forestales que poseen elevadas cantidades de lignina y celulosa como es en este caso particular la corteza de pino. La relación C/N de los desechos de la madera es típicamente mayor a 200/1 (Campbell et al., 1991).

Los microorganismos que realizan la descomposición de materia orgánica absorben el carbono y el nitrógeno en la proporción de 30 a 1, eliminando 2/3 del carbono en forma de anhídrido carbónico (CO₂) e inmovilizando en su protoplasma 1/3 del carbono. El nitrógeno excedente, no incorporado por el microorganismo, es liberado como amonio (NH₄) el cual puede combinarse con una nueva porción del carbono de la materia orgánica aún no descompuesta y ser inmovilizado en el protoplasma (Díaz et al., 1998). Por lo expresado anteriormente, cuando los materiales tienen una relación C/N mayor a la deseada (25-35/1) deben ser mezclados con materiales que tengan una relación inferior. Es así que se los mezcla con productos ricos en nitrógeno como son en este caso particular el estiércol vacuno, el estiércol de gallina y la urea. Se logra de esta manera reducir la relación en un 64% en el caso del estiércol de gallina y la urea y en un 72% en el caso del estiércol vacuno.

A lo largo del proceso de compostaje, la relación C/N va siendo cada vez menor hasta alcanzar valores propios de un compost maduro. Relaciones de 15-20/1 son aceptadas como propias de un compost maduro y estable. Sin embargo, Mathur et al. (1993) señala estudios donde el compost estaba maduro con una relación C/N 35/1.

Curbelo et al. (1996) llegan, como resultado del compostaje de despuntes, corteza y aserrín de pino, a una relación C/N de 39/1 y según Campbell et al. (1991) compost realizados a nivel comercial en Estados Unidos en base a madera llegaron a relaciones similares.

Los resultados del análisis de la relación C/N al finalizar el ensayo fueron los siguientes:

Cuadro Nº 10 - Relación C/N final de los tratamientos.

Tratamiento	% C	% N	Relación C/N
1	34	0,60	56/1
2	44	1,29	34/1
3	20	0,79	25/1

Fuente: División Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2000.

Considerando la relación C/N como indicador del grado de madurez y si nos referimos a los valores teóricamente aceptables como propios de un compost maduro realizado en base a residuos forestales, los tratamientos 2 y 3 llegaron a una adecuada relación.

Hay dos elementos importantes a tener en cuenta con respecto a este tema:

- Uno es el menor porcentaje de carbono que se obtuvo en el primer análisis para el tratamiento 1 con respecto a los otros tratamientos. Este dato llama poderosamente la atención sobre todo considerando que se parte de un mismo material (corteza de pino), con un porcentaje de carbono de 49 y que los restantes tratamientos (2 y 3) dan un porcentaje de carbono inicial de 42. En base a esto, se repitió el ensayo para el tratamiento 1 y se volvieron a obtener los mismos valores, lo que llevó a plantearse la hipótesis de la falta de homogeneidad en la muestra extraída para enviar a analizar.
- El otro elemento a considerar es que, por los motivos anteriormente expresados, no se cuenta con valores iniciales confiables para el tratamiento 1 y, por ende, no es posible compararlos con los valores finales obtenidos. De hecho, es poco coherente pensar que la relación C/N a los 10 meses de iniciado el proceso (56/1) pueda ser mayor que la inicial (49/1), como muestran los valores de los dos análisis.

4.6. pH DE LOS TRATAMIENTOS

Se analizó también el pH de los diferentes tratamientos y los resultados se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro Nº 11 - pH inicial de los tratamientos.

Tratamiento	pH
1	6,06
2	6,01
3	6,19
Corteza pino	4,45

Fuente: Agrolab, 1999

El pH de la corteza de pino está entre 4 y 5,5 (Moinereau et al., 1987). Esto significa que el valor obtenido (4,45) para la corteza sola está dentro de lo teóricamente esperable.

Se parte, como se desprende del cuadro anterior, de 3 tratamientos con pH próximos a la neutralidad, lo cual es correcto si se considera que el pH óptimo para el compostaje se sitúa en torno a ese valor. De los microorganismos que intervienen en el proceso, las bacterias actúan en un rango de pH óptimo entre 6,0 y 8,0 y los hongos en un rango aún mayor, entre 5,0 a 8,5.

A los 10 meses de iniciado el proceso se realizó un nuevo análisis de pH de los tratamientos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro Nº 12 - pH final de los tratamientos.

Tratamiento	pH
1	6,4
2	5,5
3	6,2

Fuente: División Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2000.

Teóricamente cuando el proceso comienza el material se vuelve ligeramente ácido ya que los productos iniciales de la descomposición son ácidos orgánicos simples. A los pocos días se vuelve ligeramente alcalino al liberarse amoníaco por la descomposición de proteínas (Dalzell et al., 1991).

La experiencia de los viveristas nacionales en compostaje de corteza de pino ha demostrado que los compost maduros presentan, generalmente, valores de pH entre 6,0 y 6,5 (Curbelo et al., 1996). Asimismo, sustratos forestales con pH entre 5 y 6 son adecuados para la producción de *Eucalyptus*, procediéndose en ocasiones a acidificarlos aún más para evitar ataques de Dumping-off (*³). En este sentido puede mencionarse como ejemplo al sustrato comercial forestal Eucatex cuyo pH es de 4,45. Es así que puede afirmarse entonces que los valores de pH finales de los tres tratamientos estarían dentro de los rangos normales, tanto desde el punto de vista de la madurez del compost como de su capacidad para ser utilizados como sustrato forestal.

4.7. TEMPERATURA

Los microorganismos presentan un rango de temperatura óptima de desarrollo. La respiración aerobia desarrolla un rápido calentamiento de la masa con la multiplicación de la población microbiana debido a que el metabolismo de los microorganismos es exotérmico (Díaz et al., 1998).

(*³) Gallo, L. , 2000. com. pers.

Una vez montadas las pilas, el calor es la primera información del inicio del proceso de descomposición. La ausencia de calor en los primeros días indica un fracaso debido a la falla de alguno de los factores que inciden en el proceso (Kiehl, 1985).

Asimismo, el flujo de calor producto de la respiración, que consume oxígeno y produce gas carbónico, es un indicador directo del proceso. Por lo tanto se considera a la temperatura como una medida indirecta de la intensidad de la degradación (Mustin, 1987).

De aquí surge la importancia del registro diario de la temperatura de las pilas como medida indirecta del proceso de descomposición de la materia orgánica. En este sentido, desde un primer momento la temperatura tomada a las pilas del ensayo indicó que el proceso de descomposición se estaba llevando a cabo adecuadamente.

Las medidas de temperatura realizadas a cada una de las pilas del ensayo, así como los registros obtenidos en la Dirección Nacional de Meteorología para el período julio 1999 - febrero 2000, se presentan en anexo N° 3 (cuadro N° 21). La figura N° 11 muestra la variación de la temperatura de las pilas y la temperatura ambiente en dicho período.

Durante el ensayo las pilas fueron aereadas de acuerdo a sus variaciones de temperatura, tomando como referencia los picos máximos. Si se observa la figura N° 11, el primer pico de temperatura fue alcanzado a los 11 días de instalado el ensayo para los tres tratamientos. Los siguientes picos se alcanzaron a los 40 y 81 días respectivamente, también para los tres tratamientos. Las aereaciones se efectuaron a los 25 y a los 88 días.

El último pico de temperatura se dio a los 118 días. El mismo coincidió con una importante situación de sequía en el país y la consiguiente falta de agua en el vivero. Por este motivo se decidió no aerear las pilas en ese momento para evitar las pérdidas de humedad que inevitablemente se producen por esta actividad.

Según Kiehl (1985) un compost se encuentra maduro cuando la temperatura se estabiliza, alcanzando valores similares a los del ambiente. Para poder determinar, según este parámetro, cuándo los compost analizados estarían maduros, alcanza con observar la figura N° 11 que muestra claramente el momento en que las temperaturas de las pilas alcanzan valores similares a los del ambiente. Esto ocurre aproximadamente a los 6 meses de iniciado el ensayo.

En Uruguay, la mayoría de los viveristas que producen compost utilizan la temperatura como indicador de la finalización del proceso. Cuando ésta se estabiliza en 30°C dan por terminado el proceso de compostaje (Curbelo et al., 1996).

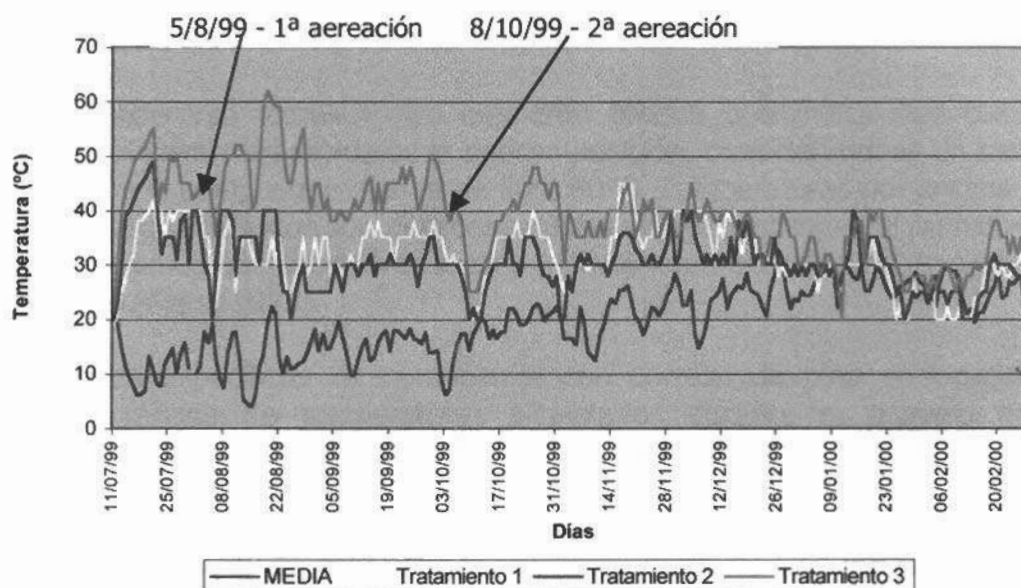


Figura N° 11 - Comparación de las temperaturas de los distintos tratamientos entre sí y con la temperatura media ambiente.

Otro elemento que puede observarse en la figura N° 11 es que las tres pilas, más allá de los valores particulares de temperatura registrados para cada una de ellas, oscilan de manera muy similar y que prácticamente durante todo el proceso de compostaje la temperatura de la pila del tratamiento 3 está más alta que las de los otros dos tratamientos (1 y 2). Esta mayor temperatura alcanzada podría explicar la mayor descomposición sufrida por los materiales de esta pila con respecto a los otros dos tratamientos como se determinó en el punto 4.3. de este capítulo.

En cuanto a las temperaturas de las pilas de los tratamientos 1 y 2 puede decirse que ambas son muy parejas durante todo el proceso, en algunos momentos llegan a superponerse y en otros se percibe una pequeña diferencia a favor de la pila del tratamiento 1. Sin embargo, si se considera la descomposición de una y otra pila no se refleja esto tan claramente ya que la disminución en volumen de dicha pila es bastante superior a la disminución en volumen de la pila del tratamiento 2.

Si se analizan las temperaturas de las pilas en relación con la temperatura media ambiente, puede observarse que oscilan de manera similar pero con valores bastante superiores. Esto es coherente ya que la descomposición aeróbica se caracteriza por la elevación de la temperatura muy por encima de la temperatura ambiente (Kiehl, 1985). Los valores se acercan más en las últimas etapas del proceso, cuando el compost está maduro.

Debe considerarse también otro elemento teórico que indica que cuanto mayor es el calor más rápida es la descomposición, considerándose un rango óptimo para el compostaje que va de 50 a 60°C. Temperaturas por encima de 70°C por largos períodos son desaconsejables ya que restringen el número de microorganismos que sobreviven a ellas y disminuyen el contenido de oxígeno de las pilas (Kiehl, 1985).

Experiencias específicas de compostaje con corteza de pino en Uruguay, muestran rangos de temperaturas alcanzados durante el proceso muy variables como por ejemplo 70-75°C; 65-75°C; 50-55°C y 40-45°C (Curbelo et al., 1996).

En el caso particular de este estudio, en ninguno de los tres tratamientos se registraron temperaturas por encima de 70°C. Para el tratamiento 1 el rango de temperaturas alcanzadas fue del orden de los 35-40°C, para el tratamiento 2 del orden de los 35°C y para el caso del tratamiento 3 de 45-50°C.

4.8. HUMEDAD

Es uno de los factores más importantes en el proceso de compostaje ya que por ser un proceso biológico de descomposición de materia orgánica la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos.

Se ha demostrado que la materia orgánica a ser compostada debe tener una humedad óptima de un 50%, siendo los límites máximo y mínimo deseables iguales a 60 y 40% respectivamente (Kiehl, 1985). La mayoría de los viveristas uruguayos mantienen las pilas a capacidad de campo (Curbelo et al., 1996).

Es por esta razón que tanto en la instalación como durante el ensayo se trató de mantener la humedad de las pilas continuamente dentro de los límites óptimos.

En este sentido cabe mencionar el problema que existió en el período noviembre - febrero por la sequía existente a nivel nacional. El vivero se quedó sin agua para poder regar las pilas y las lluvias durante ese período fueron muy escasas con respecto a las normales climatológicas del país, como puede observarse en el anexo N° 4 (cuadros N° 22 y 23). Las pilas internamente mantuvieron algo de humedad pero en su exterior estaban prácticamente secas. Es por esta razón que durante ese período se decidió no aerear las pilas para evitar dejar expuesto el material que se mantenía más húmedo en el interior de la misma.

La figura N° 12 muestra la diferencia entre las precipitaciones ocurridas durante el período del ensayo y las precipitaciones normales en el país en ese mismo período.

Si se considera además que humedades por debajo de 40% reducen la actividad microbiana y cuando llega al 30% se torna un factor limitante para la descomposición (Kiehl, 1985), en el período referido el factor humedad puede haber sido una limitante, enlenteciendo el proceso.

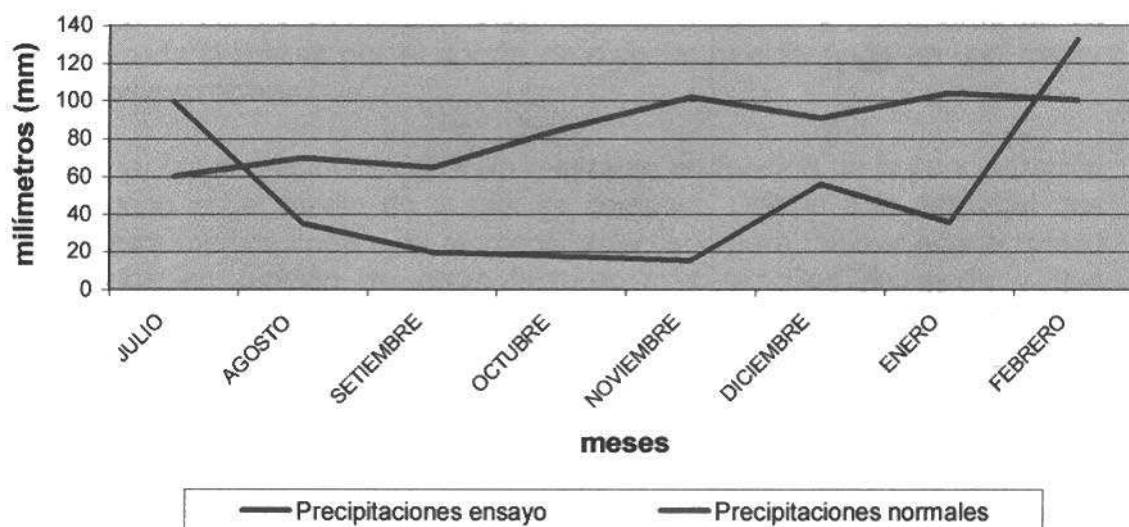


Figura N° 12 - Comparación de precipitaciones totales mensuales durante el ensayo vs. totales mensuales normales en el país (período julio - febrero).
Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

4.9. AERACION

Las aereaciones son las actividades que permiten dar las condiciones para que la fermentación sea aerobia. Si el tenor de oxígeno baja demasiado, los microorganismos aerobios mueren y son sustituidos por microorganismos anaerobios que descomponen la materia orgánica más lentamente, produciendo malos olores (Kiehl, 1985).

Lo anteriormente mencionado marca la importancia que la decisión práctica del momento de aerear tiene para el proceso.

En la figura N° 11 se indican los momentos en que las pilas se aerearon, al mes y a los tres meses de instalado el ensayo.

En la misma se observa una clara disminución de la temperatura en esos momentos, seguida de un ascenso importante en los días posteriores. Esto sucede igual para los tres tratamientos, debido a la importante incorporación de oxígeno que esta actividad produce en las pilas de compost. La aereación produce en primera instancia una disminución de la temperatura (la pila se enfría como consecuencia del movimiento de material) y posteriormente un aumento de la misma por el aporte de oxígeno que redundará en una mayor actividad microbiana.

En teoría, las aereaciones deberían realizarse en función de la concentración de oxígeno en el medio de la pila de compost. Debido a la dificultad que tomar esta medida implica, el momento adecuado para realizar esta actividad se decide en función de otros factores más sencillos de medir y que indirectamente indican la necesidad de aereación como ser la temperatura (Kiehl, 1985).

En el caso particular del estudio, fue precisamente la temperatura el factor determinante del momento de aerear las pilas.

4.10. TESTS DE GERMINACION

Los resultados de los tests de germinación realizados se presentan en anexo N° 5 (cuadros N° 24, 25 y 26).

En los tres tests se obtuvieron porcentajes de germinación bastante altos tanto para las semillas de *Eucalyptus grandis* como para las de *Lactuca sativa* (lechuga) con respecto al tratamiento control. Esto puede observarse en la siguiente tabla.

Cuadro N° 13 - Porcentaje de germinación de *Eucalyptus grandis* y *Lactuca sativa* a los 3, 5 y 7 meses de proceso.

<i>Eucalyptus grandis</i>			
Tratamiento	3 meses	5 meses	7 meses
1	93,81%	97,71%	97,43%
2	90,87%	96,96%	96,82%
3	90,47%	96,52%	97,30%
Testigo	92,24%	98,57%	96,84%

<i>Lactuca sativa</i>			
Tratamiento	3 meses	5 meses	7 meses
1	82,65%	95,30%	94,99%
2	79,20%	94,97%	94,99%
3	76,35%	93,56%	94,82%
Testigo	71,37%	95,34%	93,98%

En la figura N° 13 se presenta, para cada tratamiento y para el testigo, el porcentaje de germinación de semillas de *Eucalyptus grandis*. A los tres meses de proceso ya se obtuvieron valores de germinación muy altos (siempre mayores a 90%). Estos valores fueron aún superiores en los dos siguientes tests (5 y 7 meses respectivamente).

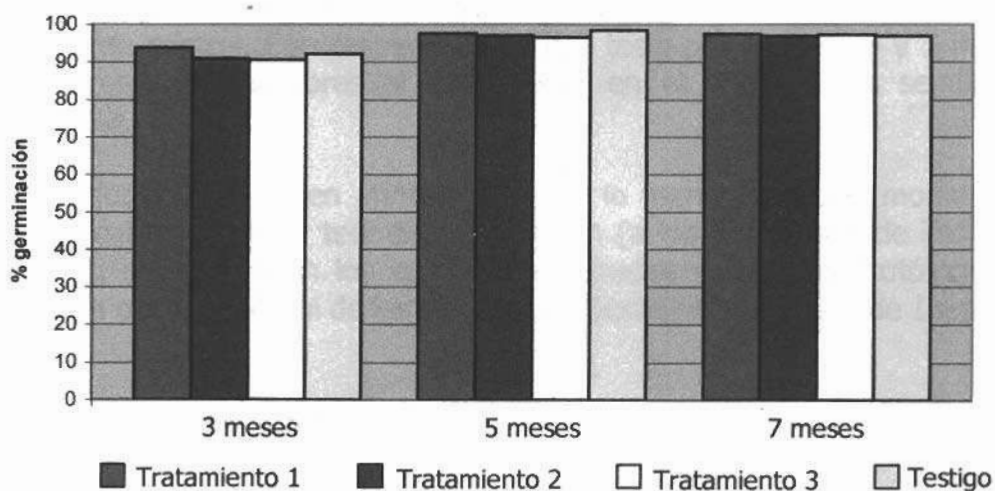


Figura N° 13 - Porcentaje de germinación de *Eucalyptus grandis* durante el proceso de compostaje.

Con respecto a las semillas de *Lactuca sativa*, los porcentajes de germinación pueden observarse en la figura N° 14.

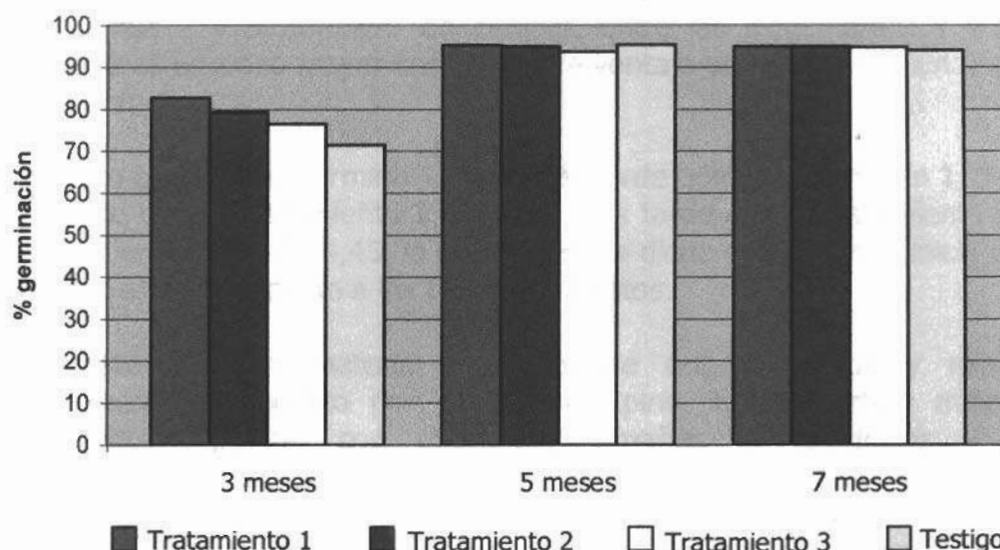


Figura N° 14 - Porcentaje de germinación de *Lactuca sativa* durante el proceso de compostaje.

Si bien los valores obtenidos a los tres meses de proceso son menores que los alcanzados por las semillas de *Eucalyptus*, son similares a los obtenidos por el tratamiento control. Con respecto a los dos tests posteriores (5 y 7 meses), los valores son superiores al 90% como en el caso de las semillas de *Eucalyptus*.

Estos resultados permiten afirmar que, por lo menos desde el momento en que se realizó el primer test de germinación (a los tres meses de iniciado el proceso), no existen en los sustratos analizados sustancias fitotóxicas que inhiban la germinación ni de las semillas de *Eucalyptus* ni de las de *Lactuca*.

4.11. EVALUACION AGRONOMICA

Los resultados de esta evaluación fueron los siguientes:

Días entre la siembra y el comienzo de la germinación de semillas:

Tratamiento 1: comenzó a germinar a los 4 días de sembrado.

Tratamiento 2: comenzó a germinar a los 6 días de sembrado.

Tratamiento 3: comenzó a germinar a los 9 días de sembrado.

Testigo (Eucatex): comenzó a germinar a los 15 días de sembrado.

Entre los tratamientos 1 y 2 la diferencia en días es muy pequeña y entre los tratamientos 2 y 3 también. En cambio, entre los tratamientos 1 y 3 la diferencia es un poco mayor con 5 días de ventaja en la germinación para el tratamiento 1.

En cuanto al Eucatex, germina 11 días más tarde que el tratamiento 1, 9 días más tarde que el tratamiento 2 y 6 días más tarde que el tratamiento 3. El Eucatex tiene un pH de 4,45, lo que explicaría dicho retraso en el inicio de la germinación con respecto a los tres tratamientos.

El **Eucatex** es un material orgánico, de origen vegetal y mineral, generalmente compuesto por cáscara de pino, turba (carbón mineral), vermiculita y perlita, con diferentes tamaños de partículas y con incorporación de fertilizante. Algunas de sus características son: buena retención de agua, material libre de plagas, inoloro, homogéneo, no provoca fermentación y reduce la muerte de plantas (*⁴). Este sustrato es utilizado por algunos viveros, sobre todo pequeños, de nuestro país (Antecedentes, ítem 2.4.2).

Conteo de semillas germinadas por bandeja:

A los 18 días de la siembra, los resultados del conteo del número de celdas con semillas germinadas por bandeja fueron los siguientes:

Cuadro N° 14 - Celdas con semillas germinadas por bandeja a los 18 días de sembradas.

Tratamiento	celdas con semillas germinadas Bandeja 1	celdas con semillas germinadas Bandeja 2	celdas con semillas germinadas Promedio
1	98	89	94
2	104	103	104
3	90	95	93
Eucatex	14	25	20

El mayor número de celdas con semillas germinadas (100%) lo tiene el tratamiento 2 que fue el que comenzó a germinar segundo. Lo siguen los tratamientos 2 y 3 con un 90% aproximadamente de celdas con semillas germinadas y por último aparece el Eucatex con apenas un 20% de celdas con semillas germinadas.

(*⁴) Empresa Eucatex Brasil, 2000. <http://www.eucatex.com.br/produtos/agricult/frame.htm>

Los resultados del segundo conteo, realizado a los 27 días de la siembra, fueron los siguientes:

Cuadro N° 15 - Celdas con semillas germinadas por bandeja a los 27 días de sembradas.

Tratamiento	celdas con semillas germinadas Bandeja 1	celdas con semillas germinadas Bandeja 2	celdas semillas germinadas Promedio
1	98	87	93
2	104	103	104
3	101	100	101
Eucatex	89	91	90

Los tratamientos 1 y 2 se mantienen en lo niveles del conteo anterior, mientras que el 3 incrementó levemente la cantidad de celdas con semillas germinadas.

El que aumentó de manera significativa fue el Eucatex que pasó de un 20% en el primer conteo a un 90% en éste, lo que demuestra que efectivamente demora más en germinar pero luego alcanza los niveles de los otros tres tratamientos.

4.12. RETENCION DE AGUA

Los resultados del análisis de retención de agua para cada uno de los sustratos pueden observarse en anexo N° 6 (cuadro N° 27).

El promedio de las tres repeticiones para cada tratamiento puede observarse en la siguiente tabla.

Cuadro N° 16 - Capacidad de retención de agua de cada tratamiento y del testigo (Eucatex).

Tratamiento	Capacidad de Retención de agua (%)
1	39,10
2	61,72
3	57,72
Eucatex	44,80

La figura N° 15 muestra las distintas capacidades de retención de agua de los sustratos.

Según Gras (1987), sustratos con partículas de dimensiones entre 4 y 8 mm retienen 17,5% de agua y sustratos con partículas de dimensiones entre 2,5 y 4 mm retienen 28,5% de agua. Si consideramos que las partículas de los tratamientos analizados son inferiores a 5 mm, en todos los casos los valores obtenidos de retención son bastante superiores a los teóricos.

El tratamiento 2 fue el que mayor capacidad de retener agua presentó (37,8% por encima del Eucatex), seguido del tratamiento 3 (28,8% superior al Eucatex) y por último el tratamiento 1 (12,7% por debajo del testigo). Este dato permitirá definir el manejo ideal de la humedad que deberá realizarse en el vivero en el futuro para cada uno de ellos.

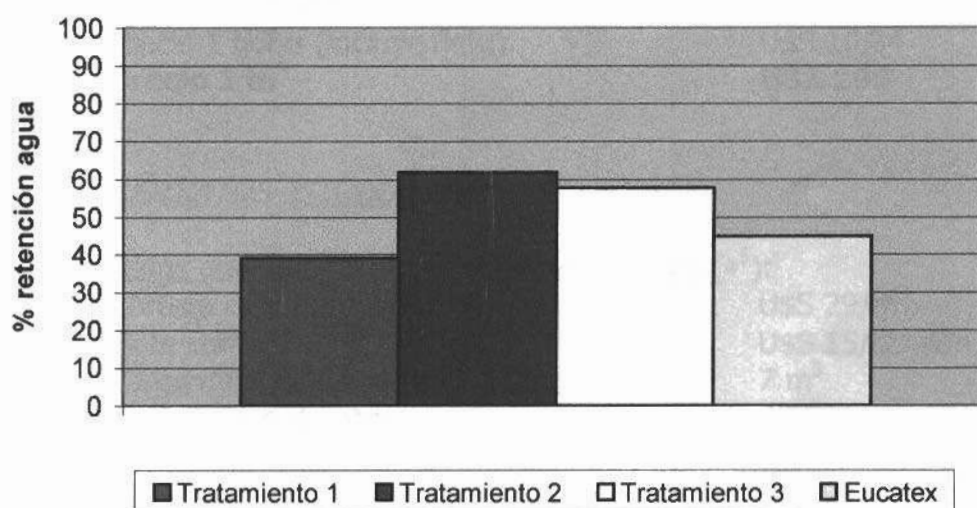


Figura Nº 15 - Capacidad de retención de agua de los diferentes sustratos.

Cuanto menor sea la capacidad de retención, mayor será la cantidad de agua que deberá incorporarse al sustrato. En este sentido, el tratamiento 1 exigirá un 12,7% más de agua para retener la misma cantidad que el Eucatex y los tratamientos 2 y 3 requerirán menor cantidad de agua que el testigo debido a su mayor capacidad de retención.

4.13. EVALUACION DE COSTOS

Los resultados de la evaluación de costos se presentan a continuación.

Primera parte: Costos del Eucatex vs. costos de los sustratos estudiados

- EUCATEX (sustrato comercial):

Datos (*⁵):

Contenido 1 bolsa	0,0556 m ³
Precio 1 bolsa	U\$S 10
Flete Eucatex	U\$S 15/m ³

Cálculos:

1 m ³ son 18 bolsas	
Precio 1 bolsa (incluye flete)	U\$S 10,84
Precio 1 m³	U\$S 195

- SUSTRATOS ESTUDIADOS:

Datos generales para los tres tratamientos (*⁵):

Corteza de pino	U\$S 29/m ³
Flete corteza	U\$S 15/camión
Carga del camión	7 m ³
Jornal mano de obra	\$ 100/persona
Zaranda (malla de 0,5 cm - 1m ancho x 2m largo)	\$ 800

Necesidad de mano de obra para los tres tratamientos (*⁵):

Molida corteza - 2 jornales por 2 días	\$ 400
Instalación de las pilas - 4 jornales por 1 día	\$ 400
Aireaciones - 2 jornales por 1 día (2 veces)	\$ 400
Tamizado del material - 6 jornales por 2 días	\$ 1200

Datos particulares para el tratamiento 1 (*⁵):

Flete estiércol vacuno	\$ 200
Carga del estiércol en camión (3 jornales de \$ 150)	\$ 450

No se considera el costo del estiércol vacuno porque no se lo cobran ni se lo van a cobrar en un futuro.

(*⁵) Bianchi, B., 2000. com. pers.

Datos particulares para el tratamiento 2 (*⁵):

Urea (46%) - bolsa 50 kg.	U\$S 15
---------------------------	---------

No se considera costo de flete porque es una única bolsa y fue trasladado en vehículo propio.

Datos particulares para el tratamiento 3 (*⁵):

Bolsa gallinaza	\$ 50
-----------------	-------

No se considera costo de flete porque las bolsas se trasladaron en vehículo propio.

Cálculos de costos generales de los tres tratamientos:

Costo total corteza (30 m ³)	U\$S 870
Costo total flete para corteza (5 camiones)	U\$S 75
Costo total mano de obra	U\$S 202
Costo zaranda (3)	U\$S 202
Total	U\$S 1349

Costo general por tratamiento (1349/3)	U\$S 450
--	----------

Cálculos de costos para el tratamiento 1:

Costo corteza + flete + mano de obra + zaranda	U\$S 450
Costo flete + carga estiércol vacuno	U\$S 55

Costo total tratamiento 1 = U\$S 505Cálculos de costos para el tratamiento 2:

Costo corteza + flete + mano de obra + zaranda	U\$S 450
Urea (46%)	U\$S 15

Costo total tratamiento 2 = U\$S 465Cálculos de costos para el tratamiento 3:

Costo corteza + flete + mano de obra + zaranda	U\$S 450
Costo gallinaza	U\$S 126

Costo total tratamiento 3 = U\$S 576

NOTA: Tipo de cambio considerado 1 U\$S = \$ 11,9

(*⁵) Bianchi, B., 2000. com. pers.

Segunda parte: Rendimiento de las pilas vs. necesidades de sustrato

- Rendimiento de las pilas a los 10 meses de proceso (proporción del material utilizable comercialmente):

Tratamiento 1	2,85 m ³
Tratamiento 2	3,29 m ³
Tratamiento 3	2,53 m ³
TOTAL	8,67 m³

El vivero cuenta actualmente con un volumen de material utilizable comercialmente de 8,67 m³.

Volumen necesario para
llenar 1 bandeja (104 celdas de 50 cm³) 0,0052 m³ (*⁶)

Con 8,67 m³ alcanza para llenar 1667 bandejas.

- Producción anual de plantas en el vivero:

Producción anual (zafra otoño + zafra primavera):	1:200.000 plantas (* ⁵)
Producción de plantas por bandeja:	104
Bandejas que se utilizan anualmente para esa producción de plantas:	11540
Volumen necesario para llenar esa cantidad de bandejas:	60 m ³

Si se considera que se necesitan llenar por año 11540 bandejas y que con el sustrato producido alcanza sólo para llenar 1667, el volumen compostado no cubre las necesidades anuales de sustrato del vivero.

Para llenar 11540 bandejas se necesitan 60 m³ de sustrato de tamaño comercialmente adecuado. Esto significa que, en función de los volúmenes de material comercialmente útil que rinde cada tratamiento, para obtener 60 m³ de sustrato deben compostarse 211 m³ de corteza para el tratamiento 1, 183 m³ de corteza para el tratamiento 2 y 238 m³ de corteza para el tratamiento 3, para cubrir las necesidades anuales de sustrato en el vivero.

(*⁵) Bianchi, B., 2000. com. pers.

(*⁶) Mantero, C., 2000. com. pers.

En base a este resultado, a continuación se realiza una aproximación de los costos en que incurriría el productor si produjera esos metros cúbicos por año de compost y los costos del sustrato comercial para esa producción total de plantas.

- Costos aproximados de producción de un volumen de compost que cubra las necesidades anuales del vivero:

Antes de comenzar con el análisis, cabe mencionar que muchos de los datos de costos para este volumen de producción de compost son aproximaciones a partir de los datos reales suministrados por el productor para el volumen producido en el ensayo.

Para el tratamiento 1:

Costo corteza (211 m ³)	U\$S 6119
Flete corteza (30 camiones a U\$S 15)	U\$S 450
Flete estiércol (20%=42,2 m ³ - 6 camiones)	U\$S 101
Carga y descarga estiércol (U\$S 38 por camión)	U\$S 228
Mano de obra (*)	U\$S 1311
Costo zaranda (9 zarandas)	U\$S 605
Total	U\$S 8814

(*) Se multiplican por siete los costos de la molienda de la corteza, instalación de las pilas y aireaciones. El costo del tamizado final se considera en base a 18 jornales por 4 días.

Para el tratamiento 2:

Costo corteza (183 m ³)	U\$S 5307
Flete corteza (26 camiones a U\$S 15)	U\$S 390
Urea (15 bolsas de 50 kg)	U\$S 225
Mano de obra (*)	U\$S 1059
Costo zaranda (9 zarandas)	U\$S 605
Total	U\$S 7586

(*) Se multiplican por seis los costos de la molienda de la corteza, instalación de las pilas y aireaciones. El costo del tamizado final se considera en base a 18 jornales por 3 días.

Sigue sin considerarse costo del flete para la urea porque se realizará en camioneta propia.

Para el tratamiento 3:

Costo corteza (238 m ³)	U\$S 6902
Flete corteza (34 camiones a U\$S 15)	U\$S 510
Gallinaza (714 bolsas a U\$S 4,2)	U\$S 2999

Flete	U\$S	34
Carga y descarga (4 jomales a U\$S 13)	U\$S	52
Mano de obra (*)	U\$S	1563
Costo zaranda (9 zarandas)	U\$S	605
Total	U\$S	12665

(*) Se multiplican por ocho los costos de la molienda de la corteza, instalación de las pilas y aereaciones. El costo del tamizado final se considera en base a 18 jomales por 5 días.

- Costos del sustrato comercial para la producción anual del vivero:

Con 1 bolsa de Eucatex se llenan 11 bandejas. Para llenar 11540 bandejas se necesitan 1050 bolsas. Si cada bolsa cuesta (incluye precio + flete) U\$S 10,83, el costo total de las 1050 bolsas sería **U\$S 11372**.

- Costos de los diferentes sustratos por planta:

Total de plantas por año	1:200.000
Costo Eucatex	U\$S 11372
Costo sustrato del tratamiento 1	U\$S 8814
Costo sustrato del tratamiento 2	U\$S 7586
Costo sustrato del tratamiento 3	U\$S 12665
Costo/planta Eucatex	U\$S 0,0094800
Costo/planta tratamiento 1	U\$S 0,0073450
Costo/planta tratamiento 2	U\$S 0,0063216
Costo/planta tratamiento 3	U\$S 0,0105541

El productor tiene actualmente un costo total por planta de U\$S 0,05 (*⁵). En ese costo considera, entre otros, el sustrato, la vermiculita que agrega a las bandejas, la mano de obra, el equipo de riego, la amortización del equipo de riego, la amortización de las bandejas, el nylon y la amortización del sombrite. Si al costo total por planta se le descuenta el costo del sustrato, se obtiene un costo por planta que se mantendrá en el caso de decidir usar los sustratos estudiados. No se descontará el costo por planta de la vermiculita porque no se sabe si se utilizará o no y el productor entiende que su peso en el costo total es insignificante. Entonces:

(*⁵) Bianchi, B., 2000. com. pers.

Costo total/ planta - costo Eucatex/planta = $0,05 - 0,00948 = \text{U}\$ 0,04052/\text{planta}$.

Costo total/planta tratamiento 1	U\$ 0,0478650
Costo total/planta tratamiento 2	U\$ 0,0468416
Costo total/planta tratamiento 3	U\$ 0,0510741

Para 1:200.000 plantas en el año, los costos para cada uno de los sustratos estudiados y para el Eucatex serán:

Eucatex	U\$ 60000
Tratamiento 1	U\$ 57438
Tratamiento 2	U\$ 56210
Tratamiento 3	U\$ 61289

Las diferencias que existirían entre el Eucatex y cada uno de los sustratos serían:

Eucatex vs. Tratamiento 1 $\text{U}\$ 60000 - \text{U}\$ 57438 = \text{U}\$ 2562/\text{año}$

Eucatex vs. Tratamiento 2 $\text{U}\$ 60000 - \text{U}\$ 56210 = \text{U}\$ 3790/\text{año}$

Eucatex vs. Tratamiento 3 $\text{U}\$ 60000 - \text{U}\$ 61289 = \text{U}\$ (- 1289/\text{año})$

Es decir que si el productor decidiera dejar de comprar Eucatex y comenzar a producir su propio sustrato, con los tratamientos 1 y 2 tendría un menor costo por año y con el tratamiento 3 tendría un mayor costo anual.

Si se comparan los costos entre los tres sustratos, se puede afirmar que:

- el tratamiento 2 es el menos costoso, seguido por el tratamiento 1 y luego por el tratamiento 3;
- el tratamiento 1 es un 2,2% más costoso que el tratamiento 2;
- el tratamiento 3 es un 9% más costoso que el tratamiento 2 y un 6,7% más costoso que el tratamiento 1.

Cabe agregar al análisis realizado que, en el caso del Eucatex, el costo estimado es exclusivamente para la producción de plantas de un año. Sin embargo, si el productor decide comenzar a producir su propio sustrato dispondrá para el año siguiente de una cantidad de material que aún no ha alcanzado un tamaño comercialmente adecuado. Dicho material puede mezclarse con nueva corteza al año siguiente, siendo una importante fuente de inóculo y disminuyendo el volumen inicial de corteza a compostar.

4.14. Consideraciones finales

En primer lugar se debe considerar que, en función de los parámetros evaluados durante el proceso, los compost producidos están maduros y pueden utilizarse como sustrato forestal. De esta forma se está dando a un residuo forestal, que de otra manera sería eliminado o no aprovechado, un uso económico que beneficia al industrial que produce el residuo y al viverista que lo utiliza como sustrato.

En segundo lugar, cabe realizar algunos comentarios adicionales:

- El ensayo fue instalado en el predio del vivero en pleno invierno (10 de julio) y, teniendo en cuenta el análisis realizado respecto al parámetro temperatura, el compost estuvo maduro a los seis meses de iniciado el proceso. Las experiencias de viveristas referidas a este tema indican que los compost instalados en otoño-invierno demoran entre seis y ocho meses en estabilizarse (Curbelo et al., 1996). Por lo tanto puede afirmarse que el tiempo que llevó el ensayo, desde su instalación hasta la maduración del compost, estaría dentro de los parámetros normales en el país.
- El período de ensayo fue muy particular en cuanto a condiciones climáticas se refiere. En relación a este tema, ya fue mencionado el problema de la gran sequía que afectó al país en primavera-verano principalmente (en comparación con los niveles normales de lluvias en el país) y cómo esto influyó en el proceso de compostaje (ítem 4.8). Es importante realizar la aclaración correspondiente y alertar sobre la posibilidad de que esta situación pueda repetirse en el futuro. Esto permitirá, al menos, prever alternativas de solución en el caso que vuelva a suceder.

- El productor deberá evaluar, en función de los resultados obtenidos, si seguirá utilizando Eucatex como sustrato o producirá su propio sustrato en base a compostaje de residuos. Para su decisión, más allá de los datos de costos, deberá considerar otros elementos como ser:
 - el lugar físico en el predio del vivero que debe destinar a la instalación de las pilas;
 - el tiempo que lleva el proceso de compostaje para contar con el volumen de material necesario, de tamaño adecuado y en el momento preciso;
 - las actividades de seguimiento que el compost requiere durante el proceso (control de temperatura, humedad, aireación y tamizado) y la mano de obra necesaria para llevarlas a cabo;
 - el costo adicional que puede significar el recurso agua en el caso que la situación de sequía vuelva a repetirse.
- En este trabajo los tres tratamientos fueron realizados por separado debido a razones experimentales. Si se realizara una única pila con todo el material (30 m³), las temperaturas alcanzadas serían más altas y se lograría una mayor retención de agua, lo que aceleraría el proceso y aumentaría el porcentaje de material comercialmente útil.

Por último reiterar que los materiales seleccionados para los tratamientos y los resultados obtenidos son para la situación de este vivero en particular. En caso de realizar extrapolaciones a otras situaciones, debe tenerse en cuenta que los resultados pueden ser otros y que deberían considerarse los elementos particulares de cada una de ellas para tomar cualquier tipo de decisión.

5. CONCLUSIONES

- El producir su propio sustrato a partir del compostaje de corteza de pino es una alternativa viable para este vivero forestal.
- De las tres combinaciones de materiales compostados, el tratamiento con gallinaza fue el que mejor comportamiento mostró en relación a la mayoría de los parámetros evaluados durante el proceso. Sin embargo, resultó también el tratamiento más costoso debido fundamentalmente a un menor rendimiento en volumen de material comercialmente útil y a un costo mayor de la fuente de nitrógeno e inóculo utilizada. Su costo es 2,15% superior al costo del Eucatex y 9% superior al costo del tratamiento con urea que es el de uso más generalizado.
- El tratamiento con urea tuvo un comportamiento inferior al tratamiento con gallinaza en relación a los parámetros evaluados durante el proceso. Sin embargo, desde el punto de vista de los costos resultó el más económico de los tres tratamientos. Con éste se obtuvo el mejor rendimiento en cuanto a volumen de material comercialmente útil y, a su vez, el material utilizado en la mezcla fue el menos costoso. Su costo es 6,3% inferior al del Eucatex.
- La elección del tratamiento a utilizar, si el viverista decide comenzar a producir su propio sustrato, dependerá del objetivo del productor (calidad, rendimiento, costo).

6. RESUMEN

Una importante cantidad de residuos forestales se producen como saldo de actividades tanto silvícolas como industriales en nuestro país. El compostaje es una de las alternativas de utilización de dichos residuos, a través de la cual se obtiene un producto estable que puede ser usado como soporte de plantines en viveros forestales. En el presente trabajo se evaluó la alternativa de un viverista forestal de producir su propio sustrato a partir del compostaje de corteza de pino. Se realizaron tres tratamientos diferentes. En cada uno se utilizaron 10 m³ de corteza de pino molida y se le incorporó 20% estiércol vacuno fresco (tratamiento 1), 5 kg/m³ urea (tratamiento 2) y 20% gallinaza (tratamiento 3). Para cada tratamiento se instaló una pila 2 m de ancho x 4 m de largo x 1.25 m de altura. La temperatura de las pilas se registró diariamente y su humedad se mantuvo entre 50 y 60%. Las aereaciones se realizaron en función de los picos máximos de temperatura de las pilas. Se determinó la relación C/N y el pH de cada uno de los tratamientos al inicio y al finalizar el proceso. Para detectar fitotoxicidad en los sustratos se realizaron tests de germinación para *Eucalyptus grandis* y *Lactuca sativa* a los 3, 5 y 7 meses. Paralelamente fue determinada la granulometría de los materiales compostados. Para los sustratos estabilizados fue determinada la capacidad de retención de agua y la capacidad de germinación y desarrollo en condiciones de vivero de semillas de *E. grandis*. Por último se analizó el trabajo desde el punto de vista de los costos. Durante el proceso de descomposición se observó la disminución en volumen de las pilas, con un rendimiento mayor del tratamiento 2 en cuanto a material de tamaño comercialmente útil (menor a 5 mm). Los valores de relación C/N y pH obtenidos al finalizar el ensayo estuvieron dentro de lo esperado. Desde el tercer mes de proceso no se detectaron sustancias fitotóxicas que inhibieran la germinación de semillas. Las temperaturas de las pilas fueron siempre superiores a la temperatura ambiental, pero no superaron los 50°C en ningún caso. En la evaluación del comportamiento en condiciones de vivero se obtuvieron buenos resultados para todos los sustratos. La retención de agua es bastante superior a la del sustrato comercial (Eucatex) para los tratamientos 2 y 3 y algo inferior para el tratamiento 1. Como conclusión, el compostaje de corteza de pino se presenta como una alternativa viable para este viverista en particular. El tratamiento de gallinaza fue el que mejor comportamiento mostró en relación a la mayoría de los parámetros estudiados, siendo, sin embargo, el de menor rendimiento en volumen comercialmente útil y el de mayor costo (9% superior al tratamiento 2 y 2.15% superior al Eucatex). El tratamiento de urea fue el que resultó menos costoso (6.3% menor al Eucatex) por su mayor rendimiento en volumen comercialmente útil.

7. SUMMARY

In Uruguay a great amount of wood residues is generated as a result of silvicultural and industrial activities. The composting process is a viable alternative for using those residues, obtaining thus an stable product which can be used as support for young plants in forestal nurseries. In this work was evaluated whether it is a valid alternative to make a substrate from pine bark in the forestal nursery. Three different treatments were performed, each one using 10 m³ of milled pine bark. Treatment number one incorporated a 20 % of fresh bovine manure; number two 5 kg/m³ of urea and number three 20% of hen manure. A pile of 1.25 m height, 2 m width, and 4 m length, was installed for each treatment. The temperature of the pile was recorded periodically and its humidity was kept between (50-60)%. Aeration was performed according to temperature peaks of the piles. The C/N ratio and pH of each treatment were determined on the beginning and the end of the process. In order to determine phytotoxicity in the substrates, germination test for *Eucalyptus grandis* and *Latuca sativa* were performed after 3,5 and 7 months. Concomitantly, the granulometry of the composted materials was determined. Water holding capacity of stabilized substrates and their germination and development capacity in conditions of forestal nursery of *E. grandis* seeds, were also determined. Finally the process for each treatment was analyzed in its economic aspect. During decomposition process the decrease in the pile volume was observed. Treatment number two showed bigger quantities of commercially useful material (< 5 mm). At the end of the process pH and C/N ratio were the expected. Since the third month, no phytotoxic substances which could cause inhibition of germination of the seeds were found. Temperature of the piles was always above the ambient, but inferior to 50°C. All substrates produced good results in the evaluation of their growing behavior in forestal nursery conditions. Water retention of the substrates corresponding to treatments two and three was superior to the commercial substrate (Eucatex), while water retention of the treatment one was slightly inferior to Eucatex. As a conclusion, the composting process with pine bark is a viable alternative to this forestal nursery. The treatment with hen manure showed the best behavior considering most of the parameters studied. However, it was the most expensive (9% above treatment 2, 2.15% above Eucatex) and the one that yielded less commercially useful volume. Treatment with urea was the cheapest (6.3% less than Eucatex) because it showed more commercially useful volume than Eucatex and hen manure.

8. BIBLIOGRAFIA

1. CAMPBELL, A., RICHARD, L. y TRIPEPI, R. 1991. Composting of wood and yard wastes. *Forest Products Journal*. 41 (3): 55-57.
2. CURBELO, I., HEINZE, M. y SCAGLIA, C. 1996. Compostaje de residuos forestales. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 80 p.
3. DALZELL, H.W., BIDDLESTONE, A.J., GRAY, K.R. y THURAIRAJAN, K. 1991. Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Roma, FAO. 178 p. (Boletín de suelos de la FAO N° 56).
4. DANILUK, G., IRISITY, F., MORAS, G., SAYAGUES, L. 2000. Estudio de rendimiento de madera aserrada en unidades de producción primaria en el Uruguay. Facultad de Agronomía. s.p. (Informe de Avance Convenio Universidad de la República-PRENADER).
5. DIAZ, R., MALVAREZ, G. y ZORRILLA, A. 1998. De residuo a recurso: Bio-reciclaje de cáscara de arroz en los humedales del este. Rocha, Facultad de Agronomía. 34 p. (PROBIDES. Serie de Documentos de Trabajo N° 15. PNUD).
6. FERMOR, T.R. 1993. Applied Aspects of Composting and Bioconversion of Lignocellulosic Materials: An Overview. Littlehampton, West Sussex, United Kingdom. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 31: 87-106.
7. GUEDES DE CARVALHO, R., GONZALEZ, C., NEVES, O. y SOL PEREIRA, M. 1991. Composting of pine and eucalyptus barks. *Bioresource Technology*. 38: 51-63.
8. KAKEZAWA, M., MIMURA, A. y TAKAHARA, Y. 1990. A two-step of composting process for woody resources. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. 70 (3): 173-176.
9. KIEHL, E.J. 1985. Fertilizantes orgânicos. San Pablo. Editora Agronômica Ceres Ltda.. 459 p.

10. LEMAIRE, F., DARTIGUES, A. y RIVIERE, L.M. 1989. Physical and chemical characteristics of a lignocellulosic material. *Acta Horticulturae*. 238: 9-22.
11. MATHUR, P.S., OWEN, G., DINEL, H. y SCHNITZER, M. 1993. Determination of compost biomaturity. I. Literature review. *Biological Agriculture and Horticulture*. 10: 65-85.
12. MATHUR, P.S., DINEL, H., OWEN, G., SCHNITZER, M. y DUGAN, J. 1993. Determination of compost biomaturity. II. Optical Density of Water Extracts of Composts as a Reflection of their Maturity. *Biological Agriculture and Horticulture*. 10: 87-108.
13. MILLER, F. y MACAULEY, B. 1988. Odours arising from mushroom composting: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 28: 553-560.
14. MOINEREAU, J., et al. 1987. Les substrats: Inventaire, caracteristiques, resources. In Blanc, D. *Les Cultures hors Sol*. Paris, Institut National de la Recherche Agronomique. 15-147.
15. MUSTIN, M. 1987. *Le compost: gestion de la matiere organique*. Paris, Francais Dubusc. 954 p.
16. PALOTTI, J. y VOLA, P. 1994. Caracterización de diferentes sustratos y envases utilizados en la producción de Eucaliptos. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 118 p.
17. REINERTSEN, S.A., ELLIOTT, L.F., COCHRAN, V.L. y CAMPBELL, G.S. 1984. Role of available carbon and nitrogen in determininig the rate of wheat straw descomposition. *Soil Biol. Biochem*. 16 (5): 459-464.
18. SCHNITZER, M., DINEL, H., MATHUR, S., SCHULTEN, H. y OWEN, G. 1993. Determination of Biomaturity. III. Evaluation of a colorimetric test by C-NMR spectroscopy and pyrplysis-field ionization mass spectrometry. *Biological Agriculture and Horticulture*. 10: 109-123.
19. TUSET, R. y DURAN, F. 1980. *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización: aserrado, secado, preservación, descortezado, partículas*. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 688 p.

20. VAN SCHOOR, M.J., SMITH, I.E. and DAVIS, C.L. 1988. Preparation and utilisation of pine bark as a growing medium for plants. Pietermaritzburg, University of Natal, Department of Horticultural Science. 150 p. (Report submitted to the Council for Scientific and Industrial Research).
21. WEBER, O., LOURES, E., BORGES, A., REGAZZI, A. y BARROS, N. 1987. Actividade da microbiota em casca de eucalipto: Efeito da aplicacao de cinza, nitrogeno e fósforo. *Revista Arvore* 11(1): 16-24.

9. ANEXOS

ANEXO 1

Cuadro Nº 17 - Calendario de actividades realizadas.

Actividad Fecha	Molida corteza	Instalación de las pilas	Aereación de las pilas	Ensayos de germina- ción	Ensayos de granulo- metría	Ensayo de retención de agua	Evaluación agronó- mica
3 y 4/7/99	■						
10/7/99		■					
5/8/99			■				
8/10/99							
13/10/99				■	■		
10/12/99				■	■		
4/2/00							
31/5/00						■	
5/6/00					■		
8/6/00							■
17/6/00							■

ANEXO 2

Cuadro Nº 18 - Resultados de los ensayos granulométricos realizados para el tratamiento 1.

3 mesesPeso Total = **276,4 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	7,4	2,68
9,5 mm	122,4	44,28
6,3 mm	40,6	14,69
4,75 mm	19,1	6,91
< 4,75 mm	85,1	30,79

5 mesesPeso Total = **419,6 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	35,2	8,39
9,5 mm	144,4	34,41
6,3 mm	76,2	18,16
4,75 mm	19,4	4,62
< 4,75 mm	141,9	33,82

7 mesesPeso Total = **422,6 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	31,4	7,43
9,5 mm	163,2	38,62
6,3 mm	61,8	14,62
4,75 mm	14,2	3,36
< 4,75 mm	149,9	35,47

10 mesesPeso Total = **299,9 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	4,8	1,6
9,5 mm	74,2	28,76
6,3 mm	68,2	18,74
4,75 mm	32,6	10,89
< 4,75 mm	119,9	40,01

Cuadro N° 19 - Resultados de los ensayos granulométricos realizados para el tratamiento 2.

3 mesesPeso Total = **281,5 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	31,9	11,33
9,5 mm	122,5	43,52
6,3 mm	48,1	17,09
4,75 mm	18,9	6,71
< 4,75 mm	58,3	20,71

5 mesesPeso Total = **379,3 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	8,2	2,16
9,5 mm	179,1	47,22
6,3 mm	71,7	18,9
4,75 mm	31,7	8,36
< 4,75 mm	86,7	22,86

7 mesesPeso Total = **364,6 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	8,3	2,28
9,5 mm	150,7	41,33
6,3 mm	66,5	18,3
4,75 mm	29,1	7,98
< 4,75 mm	108,1	29,65

10 mesesPeso Total = **303,5 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	6,7	2,2
9,5 mm	88,9	29,32
6,3 mm	59,2	19,5
4,75 mm	41,3	13,63
< 4,75 mm	107,3	35,35

Cuadro N° 20 - Resultados de los ensayos granulométricos realizados para el tratamiento 3.

3 mesesPeso Total = **385,8 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	12,1	3,14
9,5 mm	173,6	45
6,3 mm	64,4	16,69
4,75 mm	26,1	6,77
< 4,75 mm	104,6	27,11

5 mesesPeso Total = **467,8 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	25,6	5,47
9,5 mm	198,1	42,35
6,3 mm	67,5	14,43
4,75 mm	25,9	5,54
< 4,75 mm	148,3	31,7

7 mesesPeso Total = **380,4 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	3,1	0,81
9,5 mm	128,1	33,68
6,3 mm	59,9	15,75
4,75 mm	30,5	8,02
< 4,75 mm	156	41,01

10 mesesPeso Total = **301,7 grs.**

TAMIZ	Retenido (grs.)	Retenido (%)
50 mm	0	0
25 mm	3,6	1,2
9,5 mm	84,7	27,6
6,3 mm	42,1	13,7
4,75 mm	25,1	8,17
< 4,75 mm	151,4	49,33

ANEXO 3

Cuadro Nº 21 - Registros diarios de temperatura de las tres pilas y de la temperatura media ambiente.

11/07/99	19	20	22	19,5
12/07/99	21	23	31	19,3
13/07/99	25	30	40	15,1
14/07/99	27	39	44	11,6
15/07/99	30	40	46	9,6
16/07/99	32	42	49	7,8
17/07/99	38	44	50	6
18/07/99	38	45	51	6,4
19/07/99	39	46	52	6,9
20/07/99	40	48	54	13,3
21/07/99	42	49	55	11,1
22/07/99	35	39	41	8,1
23/07/99	40	32	45	7,8
24/07/99	35	35	43	12
25/07/99	40	35	50	13,3
26/07/99	38	35	49	14,7
27/07/99	40	31	50	10,1
28/07/99	40	38	45	13,5
29/07/99	40	39	45	15,8
30/07/99	40	30	45	11,1
31/07/99	40	40	42	
01/08/99	40	40	43	10
02/08/99	40	35	45	11,5
03/08/99	35	30	45	17,7
04/08/99	35	28	45	15,6
05/08/99	25	20	40	19,4
06/08/99	22	30	35	13
07/08/99	28	40	42	9
08/08/99	35	40	48	7,3
09/08/99	38	40	50	13,8
10/08/99	35	38	50	17,4
11/08/99	25	28	52	17,7
12/08/99	32	35	52	13,2
13/08/99	35	35	50	5,3
14/08/99	35	35	50	4,5
15/08/99	32	35	40	3,9
16/08/99	30	35	42	6,2
17/08/99	30	30	50	11,2
18/08/99	30	40	60	13,5
19/08/99	30	40	62	18,9

20/08/99	35	40	60	22,3
21/08/99	30	40	59	21
22/08/99	35	30	59	12,7
23/08/99	30	25	50	10
24/08/99	25	25	45	13,1
25/08/99	25	20	45	10,8
26/08/99	28	25	50	11,3
27/08/99	30	28	53	12
28/08/99	35	30	55	12,2
29/08/99	28	25	45	13,5
30/08/99	30	25	40	15,9
31/08/99	35	25	45	18,2
01/09/99	30	25	45	14,3
02/09/99	35	25	40	17,3
03/09/99	35	25	42	14,5
04/09/99	28	25	38	14,8
05/09/99	30	30	38	17
06/09/99	30	28	40	19,7
07/09/99	28	25	39	17
08/09/99	30	30	38	13,5
09/09/99	32	30	40	9,8
10/09/99	30	30	42	9,6
11/09/99	30	28	40	12,5
12/09/99	35	30	42	15,2
13/09/99	35	30	45	16,5
14/09/99	38	32	46	12,3
15/09/99	35	28	40	13,1
16/09/99	38	30	45	15,6
17/09/99	35	30	40	17,1
18/09/99	35	30	45	17,9
19/09/99	35	32	45	14
20/09/99	30	30	45	18
21/09/99	35	30	45	17,8
22/09/99	35	30	48	17,2
23/09/99	35	30	45	16,4
24/09/99	35	32	48	18,3
25/09/99	38	30	45	16,4
26/09/99	35	26	40	16,2
27/09/99	35	30	42	15,5
28/09/99	35	32	45	17,6
29/09/99	35	35	50	13,8
30/09/99	38	35	50	13,9
01/10/99	35	30	48	14,4
02/10/99	35	30	45	9
03/10/99	32	30	40	6,2
04/10/99	30	30	38	7
05/10/99	32	30	40	12

06/10/99	30	30	40	15,5
07/10/99	30	28	38	17,4
08/10/99	25	25	32	17,4
09/10/99	20	20	25	14,3
10/10/99	20	22	25	17,4
11/10/99	22	20	25	18,6
12/10/99	22	20	28	20,2
13/10/99	28	25	30	19,8
14/10/99	28	28	32	16,4
15/10/99	32	30	35	18
16/10/99	35	30	38	16,5
17/10/99	35	30	38	17,6
18/10/99	35	30	40	17,7
19/10/99	35	35	40	21,9
20/10/99	35	30	42	21,9
21/10/99	38	30	40	20,8
22/10/99	35	28	42	19
23/10/99	35	35	45	19,2
24/10/99	36	35	45	20
25/10/99	40	35	48	22
26/10/99	38	33	48	23
27/10/99	35	30	45	22,1
28/10/99	35	28	45	19,8
29/10/99	35	28	42	20,8
30/10/99	32	26	45	21,4
31/10/99	30	28	45	22,3
01/11/99	28	20	38	21
02/11/99	25	20	30	16,3
03/11/99	25	28	40	16,6
04/11/99	25	25	38	16,5
05/11/99	30	30	35	15,4
06/11/99	30	32	35	22,2
07/11/99	30	30	35	19,5
08/11/99	29	32	38	14
09/11/99	30	30	35	13,2
10/11/99	30	30	35	12,4
11/11/99	30	30	38	17,1
12/11/99	30	30	35	19,1
13/11/99	30	28	40	22,2
14/11/99	35	30	40	23,7
15/11/99	35	32	40	23
16/11/99	45	35	40	25,3
17/11/99	45	36	43	25,5
18/11/99	42	36	45	26,1
19/11/99	45	35	40	23,2
20/11/99	40	33	35	20,6
21/11/99	35	32	38	19,6

22/11/99	33	30	42	17,1
23/11/99	35	30	40	19,1
24/11/99	35	32	42	22,2
25/11/99	40	30	35	21,7
26/11/99	35	30	35	20,7
27/11/99	35	32	38	22,1
28/11/99	38	34	40	24,5
29/11/99	38	40	40	25,7
30/11/99	40	30	35	28,4
01/12/99	40	32	35	26
02/12/99	40	40	38	22,7
03/12/99	40	38	40	22,5
04/12/99	43	40	45	25,4
05/12/99	40	35	40	17,3
06/12/99	40	33	38	14,7
07/12/99	40	30	40	16,8
08/12/99	38	32	42	19,4
09/12/99	35	30	40	23,6
10/12/99	30	32	38	24,2
11/12/99	38	30	38	25,1
12/12/99	35	32	40	27,5
13/12/99	40	30	40	21,8
14/12/99	38	35	40	24,3
15/12/99	40	30	38	25,4
16/12/99	35	38	35	26,2
17/12/99	32	35	38	25,6
18/12/99	38	38	40	28,6
19/12/99	38	35	38	25,3
20/12/99	36	30	35	24,9
21/12/99	30	32	35	24,4
22/12/99	32	32	30	22,4
23/12/99	32	30	32	20,6
24/12/99	30	30	35	25,7
25/12/99	32	35	35	28
26/12/99	28	30	35	32,7
27/12/99	30	30	40	31,3
28/12/99	28	30	38	25,8
29/12/99	30	28	35	21,8
30/12/99	30	30	35	23,7
31/12/99	30	28	30	23,3
01/01/00	30	30	30	25,1
02/01/00	30	28	32	24,3
03/01/00	30	30	35	24,3
04/01/00	30	30	35	26,2
05/01/00	25	28	30	28,4
06/01/00	28	30	28	27,8
07/01/00	28	30	32	29,2

08/01/00	30	28	32	28,7
09/01/00	28	30	30	29,5
10/01/00	28	25	28	22
11/01/00	25	28	20	25
12/01/00	30	30	35	30,3
13/01/00	30	32	35	29,2
14/01/00	30	40	35	28
15/01/00	30	38	38	27,3
16/01/00	30	30	38	29,9
17/01/00	30	30	30	25,4
18/01/00	32	35	40	25,1
19/01/00	35	35	38	27,1
20/01/00	30	35	40	29,8
21/01/00	30	32	40	28,6
22/01/00	30	30	35	26,4
23/01/00	28	30	35	24,8
24/01/00	25	28	32	23,7
25/01/00	20	25	30	24,5
26/01/00	23	25	28	26,1
27/01/00	20	20	25	26,5
28/01/00	20	22	25	27,3
29/01/00	28	25	28	27,8
30/01/00	25	24	28	28,7
31/01/00	25	25	28	26,8
01/02/00	25	25	28	26,4
02/02/00	25	23	25	24,6
03/02/00	28	25	28	24,5
04/02/00	20	28	26	22,1
05/02/00	20	25	28	26,6
06/02/00	20	25	30	29,2
07/02/00	22	23	30	29,6
08/02/00	20	25	28	28,9
09/02/00	20	25	25	28,9
10/02/00	22	25	28	26,4
11/02/00	20	20	25	23,6
12/02/00	20	20	28	21
13/02/00	20	20	28	21,9
14/02/00	24	20	30	19,4
15/02/00	24	24	29	21,2
16/02/00	26	25	30	21,3
17/02/00	30	25	30	22,8
18/02/00	30	30	35	24,7
19/02/00	30	32	38	26
20/02/00	28	30	38	29,2
21/02/00	30	30	35	23,9
22/02/00	28	30	35	24,6
23/02/00	28	30	32	27

24/02/00	30	29	35	26,4
25/02/00	30	28	32	27,5
26/02/00	32	28	35	27,7
27/02/00	25	20	30	21,6
28/02/00	25	20	25	18,2
29/02/00	25	25	25	15,6

Los datos de temperatura media ambiente fueron brindados por la Dirección Nacional de Meteorología.

ANEXO 4

Cuadro Nº 22 - Datos de precipitaciones en el período junio 1999 - febrero 2000.

3/7/99	trazas
10/7/99	trazas
11/7/99	3,1
12/7/99	11,7
13/7/99	48,6
14/7/99	9,0
15/7/99	1,8
19/7/99	17,6
20/7/99	4,0
29/7/99	3,6
2/8/99	15,0
23/8/99	6,0
24/8/99	2,0
30/8/99	11,5
31/8/99	0,5
4/9/99	3,0
5/9/99	8,1
6/9/99	3,4
7/9/99	5,2
13/9/99	trazas
1/10/99	0,3
7/10/99	trazas
12/10/99	0,2
13/10/99	5,3
14/10/99	2,3
15/10/99	0,6
24/10/99	3,0
25/10/99	4,6
28/10/99	0,9
29/10/99	0,5
31/10/99	trazas
1/11/99	0,6
2/11/99	trazas
6/11/99	6,0
18/11/99	4,6
19/11/99	0,6
22/11/99	0,6
23/11/99	0,4
26/11/99	2,6
1/12/99	13,0
2/12/99	0,8
3/12/99	2,3
4/12/99	4,0
5/12/99	2,0

12/12/99	21,5
13/12/99	trazas
18/12/99	trazas
20/12/99	trazas
21/12/99	trazas
28/12/99	7,5
29/12/99	5,0
8/1/00	trazas
9/1/00	8,0
10/1/00	12,6
14/1/00	6,0
16/1/00	8,0
21/1/00	trazas
30/1/00	trazas
10/2/00	11,4
11/2/00	34,0
17/2/00	trazas
18/2/00	16,8
25/2/00	5,5
26/2/00	38,3
27/2/00	26,3

Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

Trazas = lluvias inmedibles.

Cuadro Nº 23 - Comparación de precipitaciones totales mensuales durante el ensayo vs. totales mensuales normales en el país (período julio - febrero).

JULIO	99,4	70,0
AGOSTO	35,0	65,0
SETIEMBRE	19,7	85,0
OCTUBRE	17,7	102,0
NOVIEMBRE	15,4	91,0
DICIEMBRE	56,1	104,0
ENERO	34,6	100,0
FEBRERO	132,3	153,0
TOTALES	410,2	770,0

Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

ANEXO 5

Cuadro N° 24 - Resultados del primer ensayo de germinación realizado para *Eucalyptus grandis* y para *Lactuca sativa* (G = germinadas; NG = no germinadas).

Eucalyptus**Tratamiento 1**

Placa	G	NG	% germinación
1	227	12	94,98
2	228	23	90,84
3	206	9	95,81
4	220	15	93,62
Promedio			93,81

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	206	14	93,64
2	220	23	90,53
3	209	27	88,56
4	206	21	90,75
Promedio			90,87

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	205	23	89,91
2	176	12	93,62
3	193	19	91,04
4	213	31	87,3
Promedio			90,47

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	228	7	97,02
2	233	10	95,88
3	232	40	85,29
4	236	24	90,77
Promedio			92,24

Lactuca**Tratamiento 1**

Placa	G	NG	% germinación
1	121	23	84,03
2	125	31	80,12
3	105	27	79,55
4	106	16	86,89
Promedio			82,65

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	110	25	81,48
2	78	19	80,41
3	118	33	78,15
4	76	23	76,77
Promedio			79,2

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	88	34	72,13
2	115	27	80,99
3	104	33	75,91
4	126	39	76,36
Promedio			76,35

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	88	42	67,69
2	91	26	77,78
3	99	42	70,21
4	127	55	69,78
Promedio			71,37

Cuadro Nº 25 - Resultados del segundo ensayo de germinación realizado para *Eucalyptus grandis* y para *Lactuca sativa* (G = germinadas; NG = no germinadas).

Eucalyptus

Tratamiento 1

Placa	G	NG	% germinación
1	297	6	98,02
2	306	9	97,14
3	259	3	98,85
4	304	10	96,82
Promedio			97,71

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	279	9	96,88
2	292	12	96,05
3	298	5	98,35
4	308	11	96,55
Promedio			96,96

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	282	6	97,92
2	310	15	95,38
3	320	13	96,10
4	292	10	96,69
Promedio			96,52

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	274	5	98,21
2	288	6	97,96
3	254	3	98,83
4	280	2	99,29
Promedio			98,57

Lactuca

Tratamiento 1

Placa	G	NG	% germinación
1	164	9	94,80
2	146	5	96,69
3	131	5	96,32
4	198	14	93,40
Promedio			95,30

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	165	7	95,93
2	153	11	93,29
3	148	9	94,27
4	134	5	96,40
Promedio			94,97

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	169	15	91,85
2	165	9	94,83
3	153	7	95,63
4	182	16	91,92
Promedio			93,56

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	184	5	97,35
2	158	6	96,34
3	159	13	92,44
4	179	9	95,21
Promedio			95,34

Cuadro N° 26 - Resultados del tercer ensayo de germinación realizado para *Eucalyptus grandis* y para *Lactuca sativa* (G = germinadas; NG = no germinadas).

Eucalyptus

Tratamiento 1

Placa	G	NG	% germinación
1	228	8	96,61
2	238	3	98,76
3	251	9	96,54
4	221	5	97,79
Promedio			97,43

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	219	5	97,77
2	240	10	96,00
3	242	4	98,37
4	254	13	95,13
Promedio			96,82

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	280	15	94,92
2	234	3	98,73
3	248	7	97,25
4	232	4	98,31
Promedio			97,30

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	249	5	98,03
2	250	7	97,28
3	208	11	94,98
4	198	6	97,06
Promedio			96,84

Lactuca

Tratamiento 1

Placa	G	NG	% germinación
1	109	8	93,16
2	107	6	94,69
3	106	3	97,25
4	129	7	94,85
Promedio			94,99

Tratamiento 2

Placa	G	NG	% germinación
1	112	6	94,92
2	101	4	96,19
3	105	8	92,92
4	118	5	95,93
Promedio			94,99

Tratamiento 3

Placa	G	NG	% germinación
1	105	7	93,75
2	108	4	96,43
3	109	6	94,78
4	116	7	94,31
Promedio			94,82

Testigo

Placa	G	NG	% germinación
1	107	9	92,24
2	133	5	96,38
3	136	11	92,52
4	127	7	94,78
Promedio			93,98

ANEXO 6

Cuadro N° 27 - Resultados del ensayo para determinar la capacidad de retención de agua de los diferentes sustratos y del testigo (Eucatex).

	p (gr.)	p1 (gr.)	p2 (gr.)	CRA (%)	CRA promedio
Tratamiento 1 - 1ª repetición	8,8	165,8	115,6	47,0	39,1
Tratamiento 1 - 2ª repetición	6,6	164,8	120,1	39,38	
Tratamiento 1 - 3ª repetición	9,0	167,6	130,2	30,81	
Tratamiento 2 - 1ª repetición	6,4	155,3	98,8	61,15	61,72
Tratamiento 2 - 2ª repetición	6,9	150,5	93,6	65,63	
Tratamiento 2 - 3ª repetición	8,0	157,5	102,4	58,37	
Tratamiento 3 - 1ª repetición	7,1	184,2	119,1	58,12	57,72
Tratamiento 3 - 2ª repetición	7,4	174,2	107,1	67,3	
Tratamiento 3 - 3ª repetición	8,0	205,1	141,4	47,75	
Eucatex - 1ª repetición	7,2	187,3	154,5	22,27	44,8
Eucatex - 2ª repetición	7,4	181,6	131,1	40,82	
Eucatex - 3ª repetición	8,5	196,6	118,3	71,31	

p = peso recipiente vacío (en gramos).

p1 = peso recipiente lleno de material mojado (en gramos).

P2 = peso recipiente lleno de material seco (en gramos).

CRA = capacidad de retención de agua (en porcentaje).