

UCH-FC  
B. Ambiental  
G166  
C-1

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Ciencias**



**INCIDENCIA DE AGENTES ESTRUCTURANTES EN EL  
PROCESO DE COMPOSTAJE DE ALPERUJO**

Seminario de Título  
Entregado a la  
Universidad de Chile  
en cumplimiento parcial de los requisitos  
para optar al Título de  
Biólogo con mención en Medio Ambiente

**KARINA ALEJANDRA GALLEGUILLOS SOTO**

Director de Seminario de Título: Sra. María Teresa Varnero M.

Enero, 2008  
Santiago - Chile



**“INCIDENCIA DE AGENTES ESTRUCTURANTES EN EL  
PROCESO DE COMPOSTAGE DE ALPERUJO”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con Mención en Medio Ambiente.

**KARINA ALEJANDRA GALLEGUILLOS SOTO**

*Prof. María Teresa Varnero Moreno*  
**Directora Seminario de Título**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Varnero', positioned above a horizontal line.

**Comisión de Evaluación Seminario de Título**

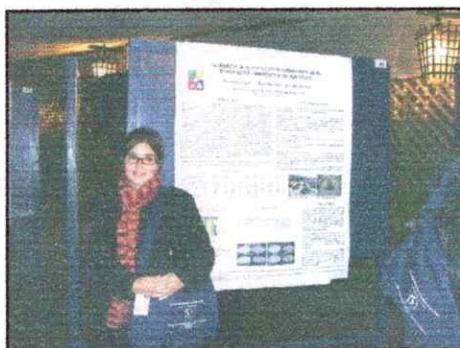
*Dra. Adriana Carrasco Rimasa*  
**Presidente Comisión**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Adriana Carrasco R.', positioned above a horizontal line.

*Dr. Luis González Fuenzalida*  
**Corrector**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis González', positioned above a horizontal line.

Santiago de Chile, Enero de 2008.



Mi nombre es Karina Alejandra Galleguillos Soto, nací en Santiago de Chile un día 10 de Diciembre de 1982.

Desde muy pequeña me interesó la naturaleza y el entorno que me rodeaba, por lo que constantemente me sentí motivada a observar y cuidar el medio ambiente.

En mi desarrollo escolar elegí el área biológica y dentro de ésta, me interesaron los temas ambientales relacionados con los ecosistemas y la contaminación que en éstos se producía, por lo que comencé a buscar carreras y universidades que respaldarán mis inquietudes.

Es por ello que al finalizar la etapa escolar y analizar las distintas opciones de estudio superior, opté por una carrera profesional que tuviera una perspectiva ambiental, de modo de contribuir como profesional a conservar y preservar el medio en que habitamos.

Mi formación en la Universidad de Chile me generó un cambio de mentalidad, pues adquirí conciencia de la gran responsabilidad que tenemos como profesionales del área ambiental. Esto debido a que cualquier decisión que se tome en esta área, se debe analizar objetivamente, con rigor científico y con ética, pues hay una herencia muy valiosa que dejar a las futuras generaciones.

*A mis Padres y Abuela, por su infinito amor...*  
*A Cristián Castro C. por su amor y compromiso incondicional...*

## AGRADECIMIENTOS

A mi profesora guía Sra. María Teresa Varnero M. por la posibilidad que me otorgó de realizar mi seminario de título, por su tiempo, consejos, comentarios y críticas que aportaron e enriquecieron el trabajo realizado.

A mis profesores de la comisión evaluadora Dra. Adriana Carrasco y Dr. Luis González, por su tiempo y dedicación para corregir este trabajo.

A Hans Yoldi de Comercial y Agroindustria Soho S.A. y al encargado de residuos orgánicos de la I. Municipalidad de La Pintana, por su gentileza para otorgar las materias primas indispensables para la realización este trabajo.

A la Sra. Concepción Alonso M. y a Don Pablo Ríos P. por su apoyo y contribución a lo largo de mi formación académica.

A mi madre por su compromiso, dedicación y amor constante. A mi padre por su compañía infinita y amor incondicional.

A Cristián Castro C. por todo el aporte intelectual, el tiempo y la ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo, por su amistad, entrega y amor.

Y a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración en los momentos oportunos, a través de críticas, consejos e ideas a través de todo el desarrollo de este trabajo.

A DIOS, amigo y guía permanente...

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xii
<b>RESUMEN</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 <b>Objetivos</b> .....	4
1.1.1 <b>Objetivos generales</b> .....	4
1.1.2 <b>Objetivos específicos</b> .....	4
<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1 <b>Proceso de compostaje</b> .....	5
2.2 <b>Características del proceso de compostaje</b> .....	5
2.3 <b>Etapas del proceso de compostaje</b> .....	6
2.4 <b>Organismos desarrollados en el proceso de compostaje</b> .....	8
2.5 <b>Requerimientos ambientales en el proceso de compostaje</b> .....	11
2.5.1 <b>Balance de nutrientes</b> .....	11
2.5.1.1 <b>Estimación del contenido de carbono</b> .....	12
2.5.1.2 <b>Relación carbono / nitrógeno</b> .....	12
2.5.1.3 <b>Efecto de la lignina sobre la biodegradabilidad</b> .....	14
2.5.2 <b>Estructura y tamaño de los residuos en una pila de compost</b> .....	15
2.5.3 <b>Control de humedad</b> .....	16

2.5.4	Control de aireación .....	17
2.5.5	Control de pH y conductividad eléctrica.....	19
2.6	Manejo y control de la pila de compost .....	20
2.6.1	Control de insectos.....	20
2.6.2	Control de olores .....	21
2.6.3	Control de la temperatura interna de la pila.....	22
2.6.4	Volteos y mezclado de la pila de compost.....	22
2.7	Alperujo y agentes estructurantes.....	23
2.7.1	Alperujo.....	23
2.7.2	Agentes estructurantes.....	26
2.8	Calidad del compost.....	28
2.8.1	Ensayo de fitotoxicidad.....	30
<b>III. METODOLOGÍA.....</b>		<b>32</b>
3.1	Lugar de estudio.....	32
3.2	Materiales y métodos .....	32
3.2.1	Materias primas y recursos .....	32
3.2.2	Diseño de las pilas de compostaje.....	34
3.2.3	Control y medición del material en proceso de compostaje.....	37
3.2.3.1	Propiedades físicas .....	37
3.2.3.1.1	Temperatura .....	38
3.2.3.1.2	Medición del contenido de agua (humedad).....	38
3.2.3.1.3	Densidad.....	40
3.2.3.2	Propiedades químicas.....	40
3.2.3.2.1	Medición de pH.....	40

3.2.3.2.2	Conductividad eléctrica .....	41
3.2.3.2.3	Materia orgánica y carbono orgánico.....	41
3.2.3.2.4	Nitrógeno total, potasio total y fósforo total.....	43
3.2.3.3	Propiedades biológicas .....	43
3.2.3.3.1	Ensayo de fitotoxicidad .....	43
3.2.3.4	Análisis estadísticos .....	46
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1	Propiedades físicas .....	47
4.1.1	Temperatura .....	47
4.1.2	Humedad .....	52
4.1.3	Densidad.....	53
4.2	Propiedades químicas.....	54
4.2.1	pH.....	54
4.2.2	Conductividad eléctrica .....	57
4.2.3	Materia orgánica.....	59
4.2.4	Carbono orgánico .....	60
4.2.5	Nitrógeno .....	62
4.2.6	Relación carbono / nitrógeno .....	63
4.2.7	Potasio .....	64
4.2.8	Fósforo.....	64
4.3	Propiedades biológicas .....	65
4.3.1	Ensayo de fitotoxicidad (Bio-ensayo).....	65

<b>V. DISCUSIÓN</b> .....	67
5.1 Propiedades físicas .....	67
5.1.1 Temperatura .....	67
5.1.2 Humedad .....	67
5.1.3 Densidad.....	68
5.2 Propiedades químicas.....	69
5.2.1 pH.....	69
5.2.2 Conductividad eléctrica .....	70
5.2.3 Materia orgánica, nitrógeno total y relación carbono / nitrógeno .....	70
5.2.4 Potasio y fósforo.....	71
5.3 Propiedades biológicas .....	71
5.3.1 Ensayo de fitotoxicidad (Bio-ensayo).....	71
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	72
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	73
<b>APÉNDICES</b>	
<b>I. Mediciones de temperatura en las pilas de compost</b> .....	77
<b>II. Análisis químicos</b> .....	82
<b>III. Contenido de macroelementos</b> .....	85
<b>IV. Bio-ensayo de fitotoxicidad</b> .....	90

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Índice de germinación que indica el nivel de fitotoxicidad .....	31
<b>Tabla 2</b>	Tratamientos .....	34
<b>Tabla 3</b>	Temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje.....	78
<b>Tabla 4</b>	Evolución del pH en los tratamientos en proceso de compostaje .....	83
<b>Tabla 5</b>	Conductividad eléctrica en los tratamientos en proceso de compostaje.....	84
<b>Tabla 6</b>	Contenido de MO en los tratamientos en proceso de compostaje .....	86
<b>Tabla 7</b>	COT en los tratamientos durante el proceso de compostaje.....	87
<b>Tabla 8</b>	Nitrógeno total en los tratamientos durante el proceso de compostaje.....	88
<b>Tabla 9</b>	Relación C/N en los tratamientos durante el proceso de compostaje .....	88
<b>Tabla 10</b>	Potasio total en los tratamientos durante el proceso de compostaje .....	89
<b>Tabla 11</b>	Fósforo total en los tratamientos durante el proceso de compostaje .....	89
<b>Tabla 12</b>	Índice de germinación de las materias primas .....	91
<b>Tabla 13</b>	Índices de germinación de los materiales en proceso de compostaje .....	91

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Sistema de centrifugación de dos fases .....	24
<b>Figura 2</b>	Características del "alperujo" .....	25
<b>Figura 3</b>	Características del compost maduro de "alperujo" .....	28
<b>Figura 4</b>	Alperujo puro .....	33
<b>Figura 5</b>	Pilas en proceso de compostaje .....	35
<b>Figura 6</b>	Sistema de aireación forzada.....	36
<b>Figura 7</b>	Pila de alperujo con sistema de aireación forzada .....	36
<b>Figura 8</b>	Termómetro midiendo la temperatura interna de una pila de compost .....	39
<b>Figura 9</b>	Bio-ensayo de fitotoxicidad con semillas de rabanito.....	45
<b>Figura 10</b>	Bio-ensayo de fitotoxicidad con semillas de lechuga .....	45
<b>Figura 11</b>	Evolución de la temperatura en los tratamientos.....	47
<b>Figura 12</b>	Temperatura del tratamiento T1 a distintas profundidades de la pila .....	50
<b>Figura 13</b>	Temperatura del tratamiento T2 a distintas profundidades de la pila .....	50
<b>Figura 14</b>	Temperatura del tratamiento T3 a distintas profundidades de la pila .....	51
<b>Figura 15</b>	Temperatura del tratamiento T4 a distintas profundidades de la pila .....	51

<b>Figura 16</b>	Evolución de la densidad durante el proceso de compostaje .....	54
<b>Figura 17</b>	Evolución del pH durante el proceso de compostaje .....	55
<b>Figura 18</b>	pH de los tratamientos al día 119 de compostaje.....	56
<b>Figura 19</b>	Conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje.....	58
<b>Figura 20</b>	Conductividad eléctrica de los tratamientos al día 119 de compostaje .....	58
<b>Figura 21</b>	Evolución de la MO durante el proceso de compostaje .....	60
<b>Figura 22</b>	Contenido de MO en los tratamientos al día 119 de compostaje .....	61
<b>Figura 23</b>	Bio-ensayo de fitotoxicidad realizado con rabanito, IG .....	66
<b>Figura 24</b>	Bio-ensayo de fitotoxicidad realizado con lechuga, IG.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS

AGRIMED:	Centro de Agricultura y Medio Ambiente
AL:	Alperujo
CE:	Conductividad eléctrica
ChP:	Chips de poda
ES:	Escobajo
K:	Potasio
MO:	Materia orgánica
N:	Nitrógeno
P:	Fósforo
Relación C/N:	Relación carbono/nitrógeno

## RESUMEN

El compostaje se presenta como una alternativa conveniente para el tratamiento de residuos orgánicos, pues permite aprovechar el potencial energético y nutricional que éstos poseen. Sin embargo, este proceso en ciertos residuos orgánicos puede resultar complejo y extenso en el tiempo, debido a las características físicas y químicas que éstos poseen. De ésta manera, el compostaje se convertiría en un método inaplicable e ineficiente, por cuanto los niveles de producción de residuos orgánicos serían mayores a los niveles de residuos tratados, con la consecuente acumulación de éstos.

Con el objeto de optimizar el proceso de compostaje del alperujo (AL), residuo orgánico obtenido de la industria productora de aceite de oliva, se seleccionaron dos tipos de agentes estructurantes, como son el escobajo (ES) y los chips de poda (ChP).

Para analizar los efectos de estos agentes estructurantes en el proceso de compostaje del alperujo, se llevaron a cabo cuatro tratamientos: T1 (100% AL), T2 (100% AL con aireación forzada), T3 (AL:ChP = 3:1), T4 (AL:ES= 3:1). Los tratamientos T1, T3 y T4 consistieron en tres pilas (triplicados) de 1 m<sup>3</sup> cada una, con volteos manuales; mientras que en el tratamiento T2, se formó una pila de 3 m<sup>3</sup>. Las diez pilas fueron compostadas durante 18 semanas aproximadamente.

Previo a la preparación de las pilas, se realizó una caracterización química y física de cada uno de los residuos orgánicos utilizados como materias primas (AL, ES, ChP).

Durante el proceso de compostaje fueron evaluados periódicamente parámetros como temperatura interna de la pila, humedad, densidad, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, relación carbono/nitrógeno, potasio total, fósforo total y fitotoxicidad.

Los resultados obtenidos indican que el sistema de volteo es más óptimo que el sistema de aireación forzada, pues permite una menor compactación del alperujo y por lo tanto una mayor oxigenación. Sin embargo, el proceso de compostaje de alperujo con sistema de volteo se ve influenciado por las características de los agentes estructurantes, de los cuales, los ChP contribuyeron más que el ES a mejorar el avance del proceso. Esto se observa, pues el tratamiento T3 con ChP, como agente estructurante, presentó una mayor velocidad de degradación ya que inicia la etapa de enfriamiento antes que el tratamiento testigo (T1) y los otros tratamientos.

Aunque, los tratamientos T1, T3 y T4 obtuvieron productos libres de fitotoxicidad y similares composiciones, los productos finales de los tratamientos T3 y T4, fueron los que obtuvieron los mejores resultados en la mayoría de los parámetros analizados en este estudio.

Palabras claves: Residuo orgánico, fitotoxicidad, sistema de volteo, sistema de aireación forzada, velocidad de degradación.

## ABSTRACT

Composting is presented as a convenient alternative for the treatment of organic waste, as this will harness the energetic potential and nutritional that they possess. However, this process in certain organic waste can be complex and lengthy in time, due to the physical and chemical characteristics they possess. In this way, composting method would become an unenforceable and inefficient, as production levels of organic waste would be higher than the levels of waste treated, with the consequent accumulation of these.

With the objective of optimizing the process of composting of "alperujo" (AL), organic by-product obtained from the olive oil extraction industry, two types of bulking agents were selected; as they are the grape stalk (GS) and the pruning chips (PC).

In order to analyze the effects of these bulking agents in the process of composting of "alperujo", four treatments were carried out: **T1 (100% AL)**, **T2 (100% AL with forced ventilation)**, **T3 (AL:PC = 3:1)**, **T4 (AL:GS = 3:1)**. The treatments T1, T3 and T4 consisted of three piles (tripled) of 1 m<sup>3</sup> each one, with mechanical turning; whereas in the case of the treatment T2, a pile of 3 m<sup>3</sup> was formed. The ten piles were composted during 18 weeks approximately.

Previous to the preparation of the piles, a chemical and physical characterization of each one of the used organic wastes as raw materials (AL, GS, PC was made).

During the composting parameters as internal temperature of the piles, moisture, density, pH, electrical conductivity, organic matter, total nitrogen, relation carbon/nitrogen, potassium, phosphorus and phytotoxicity, were evaluated periodically.

The results indicate that the system of mechanical turning is more better than the system of forced ventilation, because reduces compaction of the waste and therefore allows a greater quantity of oxygen in the piles. Nevertheless, the process of composting of "alperujo" with system of mechanical turning is influenced by the characteristics of the bulking agents, of which, the PC contribute more than GS to improve the advance of the process. This is observed, because the treatment T3, with PC like bulking agent, presented a greater speed of degradation since it initiates the cooling stage before the treatment witness (T1) and the other treatments.

Although, treatments T1, T3 and T4 produced products of similar composition and free of phytotoxicity, the end products of the treatments T3 and T4, were those that presented the best results in most of the parameters analyzed in this study.

Key words: Organic waste, phytotoxicity, system of mechanical turning, system of forced ventilation, speed of degradation.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, hay una gran diversidad de residuos orgánicos que se producen a nivel industrial, siendo la industria productora de aceite de oliva una de las más importantes en la producción de estos residuos.

En Chile, las plantaciones de olivares aceiteros ascienden a 3700 hectáreas, con aproximadamente 20 almazaras<sup>1</sup> que producen unas 1.500 toneladas de aceite de oliva extra virgen. De este modo, la industria extractiva oleica ha experimentado una gran transformación tanto en tecnologías como en expansión de superficies plantadas. Sin embargo, este avance ha presentado además un incremento en la generación de residuos orgánicos como es el caso del alperujo.

El alperujo es un residuo orgánico sólido, con un alto contenido de agua, que se obtiene mediante el proceso de centrifugación de dos fases en la extracción de aceite de oliva. Este residuo se ha convertido en el principal problema ambiental que enfrenta el sector productivo oleico, pues no existe un plan de manejo adecuado. Esto podría provocar que su disposición final sea inapropiada, lo que podría ocasionar daños ambientales futuros en ecosistemas sensibles.

El uso de alperujo como enmienda orgánica en suelos, sin un tratamiento previo, induce efectos fitotóxicos y depresivos sobre los cultivos. Estas consecuencias se asocian a la elevada salinidad, pH relativamente ácido y presencia de compuestos fenólicos, lipídicos y ácidos orgánicos de bajo peso molecular, que presenta este

---

<sup>1</sup> Almazara: Lugar donde se realiza el tratamiento de la aceituna, para la obtención de aceite de oliva.

residuo. A pesar de presentar estas características, el alperujo tratado previamente, puede ser utilizado en cultivos debido a su alto contenido de materia orgánica (compuesta principalmente por lignina, hemicelulosa y celulosa) y bajo contenido en metales pesados.

El compostaje se presenta como una tecnología conveniente para la disposición final del alperujo, pues permitiría recuperar este residuo orgánico heterogéneo, convirtiéndolo en un producto homogéneo de gran calidad llamado compost, el que podría ser utilizado como acondicionador orgánico de suelos.

Sin embargo, debido a su estructura física (bajo tamaño de partícula), asociado a un elevado contenido de agua y aceite, el alperujo tiende a compactarse impidiendo un adecuado flujo de aire en las pilas de compostaje, dificultando el proceso aeróbico de biodegradación. No obstante lo anterior, el compost de alperujo no presenta toxicidad y es rico en materia orgánica, lo que podría convertirlo en un eficiente mejorador de suelos.

Como se mencionó anteriormente, el alto contenido de agua y el tamaño pequeño de partículas, determinan que el alperujo sea un material escaso en porosidad media a gruesa y por ende susceptible a la compactación. Sin embargo, se ha demostrado que el suplementar pilas de compostaje con agentes estructurantes, (paja de trigo, desecho de algodón, aserrín de álamo, chips de corteza, etc.) permite aumentar la eficiencia del proceso en términos de duración, debido a que estos, contribuyen a que se produzca un adecuado intercambio de gases, asegurando la aerobiosis microbiana durante el compostaje.

La posibilidad de realizar en forma eficiente el proceso de compostaje de alperujo ofrece beneficios ambientales, pues permite mejorar suelos a través de la incorporación de materia orgánica y nutrientes esenciales. Además el compost obtenido del alperujo representa una alternativa conveniente para la industria productora de aceite de oliva, ya que puede ser reutilizado como abono en los cultivos de olivos aceiteros.

En el presente trabajo de investigación, se estudió el proceso de compostaje de alperujo y la incidencia que los agentes estructurantes seleccionados podrían tener en la optimización de dicho proceso. Esto se llevó a cabo, debido a que experiencias previas han demostrado que el proceso completo de compostaje de alperujo toma mucho tiempo, lo que lo hace un método ineficiente si es que se quisiera aplicar como tratamiento en las mismas plantaciones de olivares aceiteros.

Cabe mencionar, que en este estudio se abordó el proceso de compostaje en sus fases de latencia y de crecimiento, pues las etapas posteriores serán parte de un trabajo posterior, por el tiempo total que demora en compostarse el alperujo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos generales

- Optimizar el proceso de compostaje de alperujo, mediante la incorporación de agentes estructurantes, con el fin de obtener un producto estable e inocuo que pueda utilizarse como acondicionador orgánico de suelos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Reducir los volúmenes de alperujo generados por la industria productora de aceite de oliva.
- Generar un acondicionador orgánico de suelos con valor nutricional.
- Evaluar y comparar la eficiencia de dos agentes estructurantes en el proceso de biodegradación oxidativa del alperujo, como son los chips de podas y escobajo (restos de poda de parra), considerando la alta disponibilidad y bajos costos de estos residuos.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Proceso de compostaje

El proceso de compostaje se refiere a la descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos mediante condiciones aeróbicas, que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente. Con este proceso, se obtiene un producto final suficientemente estable para el almacenamiento y aplicación al suelo sin efectos ambientales adversos (Haug, 1980a). El compostaje se puede definir también como un proceso de descomposición aeróbico, debido a la acción de sucesivas poblaciones microbianas benéficas, que se desarrollan bajo condiciones controladas de aire, temperatura y humedad, donde se combinan actividades mesofílicas y termofílicas, produciendo dióxido de carbono, agua, minerales y materia orgánica estabilizada (Varnero, 2005).

### 2.2 Características del proceso de compostaje

Entre las principales características que presenta el proceso de compostaje se pueden mencionar las siguientes:

- **Estabilización de los residuos.** Las reacciones biológicas que se producen durante el proceso de compostaje convertirán las formas degradables de los residuos orgánicos en formas estables. Principalmente se estabilizarán compuestos inorgánicos, los cuales podrían provocar efectos de contaminación si se descargan sobre el suelo o en cursos de agua. (Santibáñez, 2002).

- **Inactivación de patógenos.** Durante el proceso de compostaje y debido a la actividad microbiana se obtienen elevadas temperaturas que pueden alcanzar los 60°C. Estas temperaturas son suficientes para inactivar a la mayoría de los agentes patógenos, sin embargo, se deben mantener por al menos un día. De esta manera, los productos compostados pueden ser dispuestos en forma segura, como enmiendas orgánicas sobre distintos tipos de suelos (Golueke, 1972).

- **Nutrientes y mejoramiento de suelos.** Los nutrientes (N, P, K) presentes en los residuos orgánicos se encuentran en formas complejas, dificultando la absorción de éstos por parte de los cultivos. El proceso de compostaje permite que estos nutrientes se transformen en compuestos inorgánicos, tales como nitratos y fosfatos, disponibles para la absorción que realizan las plantas. La aplicación de productos compostados a suelos reduce la pérdida de nutrientes por lixiviación, debido a que los nutrientes inorgánicos se encuentran principalmente en formas insolubles. (Golueke, 1982).

### **2.3 Etapas del proceso de compostaje**

Las fases que componen el proceso de compostaje son las siguientes:

- **Fase mesofílica.** Corresponde al tiempo necesario para que los microorganismos se adapten a las nuevas condiciones y colonicen el nuevo ambiente en la pila de compost. Los microorganismos mesofílicos presentes en la pila comienzan a descomponer los productos orgánicos. Se desprende calor y

consecuentemente aumenta la temperatura a nivel termofílico. Se producen ácidos orgánicos, por lo que el pH desciende.

- **Fase termofílica.** Tiene una duración que varía entre 15 y 30 días. Cuando la temperatura sube a 40 °C se produce la invasión de los microorganismos termófilos. Éstos a su vez, continúan la descomposición por lo que la temperatura sigue aumentando, con ello se produce la destrucción efectiva de los agentes patógenos. Los microorganismos que actúan son actinomicetes y bacterias productoras de esporas. En esta fase se degradan las sustancias como proteínas, azúcares, grasas y almidón. La hidrólisis de las proteínas produce la liberación de amoníaco, por lo que el pH desciende.
  
- **Fase de enfriamiento.** Una vez descompuestas las sustancias anteriores, la temperatura comienza a descender y tanto los hongos como otros microorganismos mesófilos, que han sobrevivido en los puntos más fríos de la pila, comienzan a multiplicarse rápidamente y descomponen productos más complejos, como la celulosa.
  
- **Fase de maduración.** Para la maduración se requieren varios meses. La temperatura disminuye a nivel mesofílico y posteriormente a temperatura ambiente. Una fermentación secundaria se produce lentamente y favorece la humificación, que es la transformación de algunos complejos orgánicos a coloides húmicos asociados con minerales y finalmente a humus. En esta fase también se desarrollan reacciones de nitrificación, en las cuales el amoníaco (subproducto de la estabilización de los residuos) es oxidado biológicamente para transformarse a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y finalmente a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Metcalf y Eddy, 1991).

Debido a que, el nitrato es la forma en que el nitrógeno está más disponible para la absorción de los cultivos, la fase de maduración constituye una etapa esencial en el proceso de compostaje para producir un compost de buena calidad que pueda ser utilizable como acondicionador orgánico de suelos.

#### **2.4 Organismos desarrollados en el proceso de compostaje**

El compostaje es un proceso biológico, en el cual, parte de los residuos orgánicos son convertidos en humus estabilizado por la actividad de diversos microorganismos. Una diversa población biológica se desarrolla en respuesta a diferentes parámetros ambientales dentro de la pila de compostaje, tales como temperatura, humedad, oxígeno y pH.

- **Microorganismos**

Los microorganismos son el primer nivel de consumidores (hongos y bacterias, principalmente actinomicetes) que descomponen los residuos orgánicos.

La estabilización de los residuos es realizada principalmente a través de reacciones bacterianas. Las condiciones químicas y físicas de la pila de compostaje afectan las actividades de estas poblaciones, siendo la temperatura un factor importante que influye en su crecimiento, desarrollo y proliferación.

Durante el proceso de compostaje existe una continuidad de microorganismos, algunos que actúan a temperaturas muy bajas y otros a temperaturas altas. Los

mesófilos presentan una temperatura óptima entre 15 - 45°C y los termófilos, actúan a temperaturas óptimas que varían entre 45 – 70°C.

La descomposición inicial es llevada a cabo por microorganismos mesófilos, que actúan sobre compuestos solubles de fácil degradación. El calor que produce su actividad, hace que la temperatura en la pila de compost comience a aumentar rápidamente, llegando a los 40°C, lo que provoca que los microorganismos mesófilos sean menos competitivos y comiencen a actuar los termófilos, que actúan descomponiendo los compuestos más resistentes que poseen mayor contenido de celulosa y hemicelulosa. Si la temperatura asciende a valores muy altos, por ejemplo 65 – 70 °C, los hongos, actinomicetes y la mayoría de las bacterias se inactivan y sólo se desarrollan bacterias que forman esporas.

Dentro de los microorganismos que se desarrollan en el proceso de compostaje podemos mencionar los siguientes:

1. **Bacterias:** Son las principales responsables de la descomposición y generación de calor. Las bacterias mesófilas cumplen un rol importante durante la primera etapa de compostaje, principalmente por su habilidad de crecer rápidamente en proteínas solubles y otros sustratos fácilmente disponibles (Miller, 1991). Durante la segunda etapa, cuando las temperaturas aumentan sobre los 40°C comienzan a predominar las bacterias termófilas. Las poblaciones bacterianas presentes durante el proceso, pertenecen principalmente al género *Bacillus* (Strom, 1985).

Una vez que el proceso de compostaje entra a su etapa de enfriamiento, las bacterias mesófilas nuevamente predominan, siendo la recolonización dependiente del tipo de esporas generadas en las etapas anteriores.

2. **Actinomicetes:** Estos microorganismos son bacterias filamentosas que carecen de núcleo, pero forman una estructura ramificada de filamentos (micelio), similar a la que forman los hongos filamentosos. Algunas especies aparecen durante la etapa termofílica y otras durante la etapa de enfriamiento o maduración, donde sólo quedan los materiales más resistentes. Estos microorganismos son esenciales para la degradación de compuestos orgánicos complejos como materiales leñosos, paja y aserrín (Labrador, 1996). Las especies comunes de actinomicetes son *Streptomyces* y *Thermoactinomyces* (Strom, 1985).

3. **Hongos:** Actúan en la etapa de maduración, cuando las temperaturas son moderadas y los sustratos son predominantemente los más resistentes, como la lignina (Miller, 1991). La especie de hongo más común es *Aspergillus* (Strom, 1985).

#### ▪ **Macroorganismos**

Los macroorganismos participan en la degradación de los distintos residuos cumpliendo la función de romper los materiales, logrando que las partículas tengan una mayor superficie de contacto, para así facilitar la acción de los microorganismos.

Éstos forman el grupo de consumidores de segundo y tercer nivel en la sucesión biológica, dentro de los cuales podemos mencionar escarabajos, nemátodos, centípedos, ácaros, ciempiés, hormigas entre otros.

## **2.5 Requerimientos ambientales en el proceso de compostaje**

El proceso de compostaje depende de grupos de organismos que habitan y estabilizan los residuos orgánicos, de manera que cualquier alteración física o química puede afectar el desarrollo y crecimiento microbiano en la pila de compost. Los parámetros ambientales que deben ser controlados durante el compostaje son los siguientes.

### **2.5.1 Balance de nutrientes**

La composición del compost es variada dependiendo del tipo de residuo orgánico que se manipule. Nutrientes tales como; carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, sodio y calcio pueden formar parte de compuestos que se encuentran en los residuos.

El parámetro nutricional primordial es la relación carbono/nitrógeno. El fósforo también es importante, mientras que el azufre, calcio y cantidades trazas de otros elementos, son necesarios en el metabolismo celular.

En el proceso de compostaje, los nuevos microorganismos asimilan entre un 20 y 40 por ciento del carbono de los residuos orgánicos (Alexander, 1961). El resto es convertido en  $\text{CO}_2$  en los procesos de producción de energía. Sin embargo, estos microorganismos contienen aproximadamente 50 por ciento de carbono y 5 por ciento de nitrógeno en base seca. De esta manera, el requerimiento de nitrógeno en el sustrato para producir compost es de 2 a 4 por ciento de carbono inicial, obteniéndose una relación C/N de 30:1 aproximadamente.

### 2.5.1.1 Estimación del contenido de carbono

El proceso de compostaje permite convertir materia orgánica, fácilmente degradable, en formas inorgánicas más estables (dióxido de carbono, agua, amonio, nitrato, metano, etc.). Por ello es relevante cuantificar el contenido de materia orgánica total y el contenido de carbono orgánico total, tanto en residuos previos a ser compostados, como en aquellos composts maduros (Varnero, 2005).

El porcentaje de carbono se puede estimar mediante el contenido de sólidos volátiles. Los sólidos volátiles son componentes (principalmente carbono, oxígeno y nitrógeno) que se calcinan, a partir de una muestra seca, en una mufla a 600 °C, quedando sólo cenizas (calcio, magnesio, fósforo, potasio y otros minerales que no se oxidan). El contenido de carbono en los materiales orgánicos se encuentra entre un 40% a 60% en la fracción de sólidos volátiles.

### 2.5.1.2 Relación carbono / nitrógeno

La relación C/N expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene una materia prima. Tanto el carbono como el nitrógeno son nutrientes esenciales en la descomposición microbiana. El carbono proporciona una fuente de energía y constituye un 50 por ciento de la masa de los microorganismos. El nitrógeno por su parte, es el componente principal de las proteínas, ácidos nucleicos y aminoácidos necesarios para el crecimiento y funcionamiento celular. Una relación adecuada entre estos nutrientes, favorecerá el buen crecimiento y desarrollo de la población microbiana que realiza el proceso de compostaje. (Richard, 1992; Varnero, 2005).

La relación C/N inicial adecuada para comenzar el proceso de compostaje es generalmente 30:1, es decir, 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno. Si la relación es menor, habrá nitrógeno en exceso y se perderá como gas amoníaco, produciendo olores pestilentes. Sin embargo, si la relación es mayor implicará que no habrá suficiente nitrógeno para el crecimiento óptimo de las poblaciones de microorganismos, por lo que el compost permanecerá relativamente frío y la degradación ocurrirá lentamente (Santibáñez, 2002). Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada es necesario, realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para poder obtener la relación C/N óptima (Varnero, 2005).

Una vez que el compostaje comienza, la relación carbono/nitrógeno disminuye desde valores superiores de 30:1 hasta alcanzar proporciones aproximadas de 10-15:1 para el producto final. Esto se debe, a que cuando los compuestos orgánicos son consumidos por los microorganismos, dos tercios del carbono es liberado como CO<sub>2</sub> y el carbono restante es incorporado, junto con parte del nitrógeno, en células microbianas (Santibáñez, 2002).

Para obtener la relación C/N de la mezcla completa de residuos orgánicos que se van a compostar se aplica la siguiente formula (Varnero, 2005):

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{C_i * Q_i}{N_i * Q_i} = \frac{C_1 * Q_1}{N_1 * Q_1} + \frac{C_2 * Q_2}{N_2 * Q_2} + \dots + \frac{C_n * Q_n}{N_n * Q_n} \quad (2.1)$$

Donde:

K = relación C/N de la mezcla de materias primas

C = carbono orgánico contenido en cada materia prima (expresado en porcentaje)

N = nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima (expresado en porcentaje)

Q = peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas

### 2.5.1.3 Efecto de la lignina sobre la biodegradabilidad

Los materiales leñosos y fibras vegetales por su estructura química, en general son muy resistentes a la descomposición. Esto se debe a que la pared celular de las plantas está formada por tres compuestos importantes: celulosa, hemicelulosa y lignina.

La celulosa es una cadena larga de moléculas de glucosa, ligadas entre si mediante enlaces glucosídicos. La simplicidad estructural de esta molécula implica que se requiere un número pequeño de enzimas para degradar este material (Ladisch y col, 1983).

La hemicelulosa es un polímero de xilosa, arabinosa, galactosa, manosa y glucosa. Esta molécula le da estabilidad a la pared celular (Lynch, 1992).

La lignina es un polímero complejo de unidades de fenilpropano que se encuentran unidas entre si mediante diferentes enlaces químicos. Esta complejidad estructural produce que la lignina sea particularmente difícil de degradar, por acción microbiana, y reduce la biodisponibilidad de los otros constituyentes de la pared celular disminuye (Richard, 1992). Sin embargo, algunos microorganismos principalmente

hongos, han desarrollado enzimas que pueden romper los enlaces de la lignina (Kirk y Farrell, 1987). Los actinomicetes también pueden descomponer la lignina, no obstante degradan menos del 20 por ciento de la lignina total presente (Crawford, 1986; Basaglia y col, 1992). La degradación de la lignina es un proceso principalmente aeróbico y en un ambiente anaeróbico la lignina puede persistir por periodos muy extensos (Van Soest, 1994).

### **2.5.2 Estructura y tamaño de los residuos en una pila de compost**

Los residuos orgánicos presentan diferente estabilidad estructural y tamaños de partículas, lo que implica diferencias en la velocidad de descomposición. La descomposición ocurre principalmente cerca de la superficie de las partículas, donde la difusión del oxígeno dentro de los films acuosos que cubren las partículas, es el adecuado para el metabolismo aeróbico y el sustrato es fácilmente accesible para los microorganismos y sus enzimas extracelulares. Las partículas pequeñas tienen mayor área superficial por unidad de masa o de volumen que las partículas grandes, por lo tanto si la aireación es adecuada, las partículas más pequeñas se degradan más rápidamente.

Se ha demostrado experimentalmente que el proceso de chipeado de las materias primas del compost puede incrementar la velocidad de descomposición (Gray y Sherman, 1970). Sin embargo, se debe considerar que tamaños inferiores a 3 mm en los residuos orgánicos, genera problemas de compactación lo que favorece la degradación anaeróbica, generando malos olores debido a la producción de sulfuro de hidrógeno (Varnero, 2005).

Teóricamente se ha sugerido que en las partículas que tienen un tamaño mayor a 1 mm, el oxígeno no difunde completamente hasta el centro de éstas (Haug, 1993). Por lo tanto, las regiones interiores de las partículas grandes probablemente son anaeróbicas y por ende la velocidad de descomposición en estas regiones es más lenta. Además, las condiciones anaeróbicas son un problema mayor cuando las partículas son muy pequeñas, ya que los poros estrechos resultantes se llenan de agua fácilmente, debido a la acción capilar. Por ende, es necesario agregar un material estructurante, que tenga un tamaño suficiente como para mantener aire en los espacios de la mezcla de compost y también que sirva para darle soporte estructural a la pila de compostaje (Polprasert y col, 1980).

### **2.5.3 Control de humedad**

Un contenido de humedad óptimo en la mezcla de compost es necesario para la descomposición microbiana de los residuos orgánicos. El agua es esencial para la solubilización de nutrientes y el protoplasma celular (Santibáñez, 2002).

Ahora bien, un contenido de humedad menor al 20 por ciento, puede inhibir drásticamente la actividad biológica, reduciendo la velocidad de estabilización y retardando el proceso de descomposición por inhibición de la actividad biológica. Esto podría ocasionar que la temperatura de la pila de compost descendiera bruscamente, lo que conduciría a interpretar erróneamente como el fin del proceso. Con esto, se obtendrían compuestos físicamente estabilizados pero biológicamente inestables (Satrina, 1974).

Por otra parte, un contenido muy alto de humedad puede producir el lixiviado de nutrientes y patógenos desde la pila de compost. En el compostaje aeróbico, el exceso de agua puede bloquear el paso de aire, provocando que la pila se vuelva anaeróbica, produciendo fermentaciones indeseables que pueden dar origen a sustancias tóxicas para las plantas, así como generación de malos olores. Un contenido de humedad entre 45 y un 55 por ciento es el más adecuado y debe mantenerse durante el proceso de compostaje (Haug, 1979).

El contenido de humedad de la mezcla de materias primas se puede calcular con la siguiente fórmula (Varnero, 2005):

$$G(\%) = \frac{(Q_1 * M_1) + (Q_2 * M_2) + \dots + (Q_n * M_n)}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n} \quad (2.2)$$

Donde:

G = humedad de la mezcla (expresado en porcentaje)

Q = peso fresco (húmedo) de cada materia prima, expresado en kilos o toneladas

M = contenido de humedad de cada materia prima (expresado en porcentaje)

#### **2.5.4 Control de aireación**

El compostaje aeróbico requiere de una aireación adecuada para proporcionar oxígeno suficiente para que los microorganismos aeróbicos estabilicen los residuos orgánicos (Santibáñez, 2002).

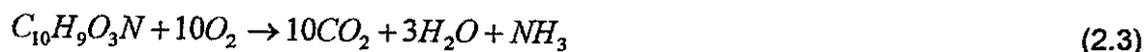
Una pila de compost bien aireada debe tener por lo menos un 5% de oxígeno durante las fases activas del compostaje, para asegurar el funcionamiento del proceso.

Esto se puede lograr mediante distintos métodos tales como volteos periódicos de las pilas de compost o inserción de tubos perforados en éstas.

Una manera alternativa de airear una pila de compost es a través del método de aireación forzada, en el cual el aire es bombeado a través de tubos perforados. Cuando se utiliza este tipo de aireación, el flujo de aire debe estar debidamente controlado, pues un exceso de aireación provoca un gasto de energía innecesario y puede generar pérdida de calor en la pila. Por el contrario, una aireación deficiente puede conducir a condiciones anaeróbicas dentro de la pila de compost, produciendo una disminución del proceso de degradación, junto con la producción de malos olores.

Un método para determinar los requerimientos de aireación se basa en la reacción estequiométrica de la oxidación de los residuos. Sin embargo, para utilizarlo es necesario conocer la composición química de los residuos que van a ser compostados. Como el compost es una combinación de varios compuestos orgánicos, generalmente se utilizan las formulas  $C_{10}H_9O_3N$  y  $C_5H_7O_2N$ , para representar su composición química (Haug, 1980).

Utilizando las formulas antes mencionadas, las ecuaciones estequiométricas para la oxidación completa de estos compuestos son:



### 2.5.5 Control de pH y conductividad eléctrica

El compostaje aeróbico normalmente se realiza a un pH cercano al neutro, con ocasionales o escasas, bajas o alzas extremas de pH. Una pequeña disminución de pH puede ocurrir durante los primeros días de compostaje debido a la producción de ácidos grasos volátiles. Después de este periodo, una vez que estos ácidos se han convertido en metano y dióxido de carbono, el pH nuevamente adquiere un valor cercano a la neutralidad (McKinley y col, 1985). Si se presentan condiciones anaeróbicas durante el proceso de compostaje, tal como ocurre en pilas demasiado grandes, el pH puede descender hasta 4,5.

Los residuos orgánicos agropecuarios generalmente presentan valores de pH cercanos a la neutralidad. Algunos residuos provenientes de actividades agroindustriales, presentan rangos de pH marcadamente ácidos y se caracterizan por su estabilidad, es decir, son resistentes a la degradación. El rango de pH tolerado por los microorganismos es relativamente amplio, donde existen grupos fisiológicos adaptados a valores extremos. Sin embargo, se favorece el desarrollo de microorganismos, con pH cercanos a la neutralidad, ligeramente ácidos o ligeramente alcalinos (Varnero, 2005).

La conductividad eléctrica es una medida de la concentración de sales solubles en la fase líquida del compost. La medición de esta propiedad está determinada por el paso de corriente eléctrica que se genera entre dos electrodos separados a una distancia conocida, inmersos en una muestra acuosa. El incremento de la conductividad eléctrica es proporcional a la cantidad de sales disueltas en el agua.

Este parámetro ha sido utilizado ampliamente como criterio de calidad de enmiendas orgánicas (Vogtmann y col, 1993).

## **2.6 Manejo y control de la pila de compost**

El manejo de una pila de compost, implica cuatro actividades básicas:

### **2.6.1 Control de insectos**

Uno de los problemas más importantes en el proceso de compostaje es el control de los insectos. La larva de la mosca en el material en proceso de compostaje puede tener su origen en los huevos puestos en el lugar de recolección de los residuos o en la planta de compostaje. Si la principal causa estuviera en la segunda opción, el control de las moscas no representaría un problema, pues el material debiera ser preparado inmediatamente para el compostaje de modo que la alta temperatura y las condiciones del ambiente impidan el crecimiento eventual de las moscas (Cantanhede y col, 1993).

El ciclo de vida de la mosca doméstica es usualmente de 7 a 14 días cuando las condiciones son favorables. El tiempo para los distintos estados varía con la temperatura y otras condiciones.

Las medidas para el control de las moscas deben interrumpir su ciclo de vida y prevenir el surgimiento de moscas adultas (Gotaas, 1956).

### **2.6.2 Control de olores**

Controlar la emanación de olores es uno de los principales problemas en el proceso de compostaje. Las fuentes de olor en los residuos orgánicos generalmente provienen de compuestos de bajo peso molecular y volátiles, tales como metil mercaptanos, metil sulfuros y aminas. Para regular y controlar los olores es necesario cuantificar y medir éstos compuestos, usando técnicas químicas e instrumentales (Haug, 1980b).

La emanación de olores es más intensa si el compostaje de residuos orgánicos se desarrolla en forma anaeróbica, es decir, en ausencia de oxígeno. El proceso anaeróbico además de generar mal olor, produce gases peligrosos y no siempre permite obtener un compost final correctamente estabilizado. Por lo tanto, es necesario asegurar la circulación de aire y la humedad conveniente para garantizar que el proceso permanezca aeróbico, reduciendo así la emanación de olores desagradables.

### **2.6.3 Control de la temperatura interna de la pila**

El calor producido biológicamente en una pila de compost es importante pues:

1. Maximiza la velocidad de descomposición.
2. Ayuda a producir un material microbiológicamente inocuo para ser usado.

Las temperaturas en el compost que superan los 60–65 °C, sobre el rango termofílico, reducen la tasa de descomposición en las pilas de compostaje. Se debe agregar además, que la mayoría de los microorganismos patógenos son efectivamente inactivados a temperaturas superiores a los 50 °C. Por ende, controlar la temperatura en el proceso de compostaje es esencial para optimizar la degradación del material orgánico e inactivar la acción de agentes patógenos. La temperatura puede ser controlada mediante el manejo de la aireación y el contenido de humedad. (McKinley y col, 1985).

### **2.6.4 Volteos y mezclado de la pila de compost**

Los procedimientos como el volteo periódico y la limpieza sistemática, son útiles para proporcionar un compost de buena calidad, destrucción de parásitos y microorganismos patógenos. Además permiten controlar efectivamente la proliferación de moscas (Gotaas, 1956).

Los volteos se realizan en función del descenso de la temperatura interna de la pila. Esta actividad permite mezclar aquellas capas externas frías no descompuestas,

con el núcleo central más biodegradado, reiniciando el proceso de colonización microbiológica. Esto genera que todo el material se exponga a altas temperaturas, obteniendo un material inocuo y homogéneo (Santibáñez, 2002; Varnero, 2005).

## **2.7 Alperujo y agentes estructurantes**

### **2.7.1 Alperujo**

En la extracción de aceite de oliva, se lleva a cabo un proceso denominado centrifugación de dos fases, (Figura 1) el cual presenta beneficios ambientales pues disminuye la generación de residuos líquidos y contaminantes que se producen en dicha extracción. Sin embargo, de este proceso se obtiene un subproducto orgánico denominado "alperujo" (Martínez, 2005). Este residuo está compuesto por pulpa de aceituna, aceite residual, agua de los restos vegetales y fragmentos de hueso de aceituna, además del agua que se agrega durante el proceso de centrifugación.

El alperujo es un residuo sólido con un alto contenido de humedad, que presenta además un pequeño tamaño de partícula, lo que lo hace un material escaso en porosidad media a gruesa, y por lo tanto susceptible a la compactación. Estas características son un obstáculo para una correcta aireación en el proceso de compostaje, ya que éste se debe llevar a cabo en condiciones adecuadas de humedad, balance de nutrientes, estructura y distribución de flujo de aire.

Este residuo se caracteriza por tener un pH ácido, una alta conductividad eléctrica y presentar un alto contenido de potasio y materia orgánica, compuesta

principalmente por lignina, hemicelulosa y celulosa (Figura 2). Otros compuestos presentes en este residuo son la grasas y carbohidratos hidrosolubles que son degradados fácilmente por la acción microbiana (Albuquerque y col, 2004).

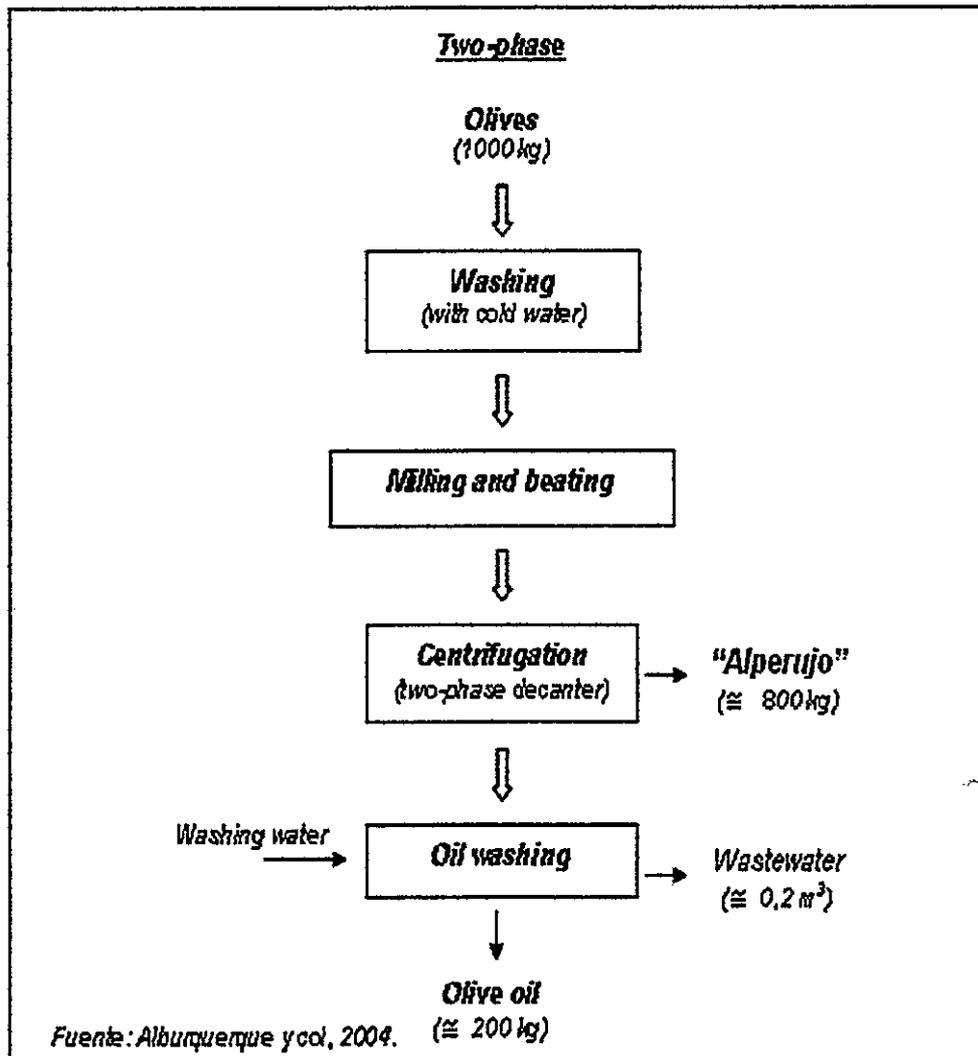


Figura 1. Sistema de centrifugación de dos fases

Un factor crítico para el proceso de compostaje de este residuo es la baja disponibilidad de nitrógeno que presenta, lo que genera elevados valores de relación C/N respecto de los valores definidos para materiales utilizables como enmiendas orgánicas. Estudios previos han demostrado que el alperujo posee además, una

pequeña pero efectiva fracción de sustancias fenólicas hidrosolubles, que junto con la fracción lipídica generan efectos fitotóxicos que afectan a las comunidades microbianas (Alburquerque y col, 2004).

Main characteristics of the "alperujo" samples (dry weight)			
Parameters	Mean	Range	CV (%)
Moisture (% fresh weight)	64.0	55.6-74.5	7.6
pH <sup>a</sup>	5.32	4.86-6.45	6.6
EC <sup>a</sup> (dSm <sup>-1</sup> )	3.42	0.88-4.76	33.9
Ash (g kg <sup>-1</sup> )	67.4	24.0-151.1	42.5
TOC (g kg <sup>-1</sup> )	519.8	495.0-539.2	2.8
C/N ratio	47.8	28.2-72.9	22.1
TN (g kg <sup>-1</sup> )	11.4	7.0-18.4	24.5
P (g kg <sup>-1</sup> )	1.2	0.7-2.2	29.7
K (g kg <sup>-1</sup> )	19.8	7.7-29.7	34.2
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	4.5	1.7-9.2	57.3
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	1.7	0.7-3.8	58.7
Na (g kg <sup>-1</sup> )	0.8	0.5-1.6	36.6
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	614	78-1462	74.9
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	17	12-29	28.8
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	16	5-39	70.2
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	21	10-37	36.3

CV: coefficient of variation,  
<sup>a</sup> water extract 1:10.

Fuente: Alburquerque y col, 2004.

Figura 2. Características del "alperujo"

El problema de la disposición final del alperujo no ha sido resuelto completamente, y el compostaje de este residuo se presenta como una buena alternativa, pudiendo utilizarse el compost final como enmienda orgánica en suelos. Sin embargo, y como se mencionó anteriormente, se requiere de un tratamiento previo pues la aplicación directa de alperujo genera efectos adversos en la estabilidad y estructura de los suelos, produciendo efectos negativos en la germinación de semillas, crecimiento de plantas y actividad microbiana, debido a los efectos fitotóxicos asociados con el pH ácido, alto contenido de ácidos grasos y compuestos fenólicos. (González et al., 1990; Alburquerque y col, 2004).

Los beneficios que presenta el compostaje del alperujo, se relacionan con el incremento de materia orgánica en suelos, el cual favorece la formación y mantenimiento de agregados lo que confiere una mayor resistencia a la erosión. Por otra parte la liberación de nutrientes es progresiva lo que evita pérdidas de elementos por lixiviación, disminuyendo así los problemas de contaminación de aguas (Martínez, 2005).

### **2.7.2 Agentes estructurantes**

Estudios anteriores han demostrado que es eficiente agregar residuos orgánicos (aserrín, paja de trigo, chips de madera o ramas trozadas) como agentes estructurantes, al proceso de compostaje de alperujo. Éstos permiten un adecuado intercambio de gases y previenen la excesiva compactación del material en proceso de compostaje, lo que a su vez mejora las propiedades estructurales de los productos compostados.

El utilizar agentes estructurantes en procesos de compostaje, permite que el proceso mismo se realice en condiciones aeróbicas adecuadas, logrando que la biodegradación oxidativa de los residuos se produzca en menor tiempo.

Por otra parte, se ha demostrado que usar agentes estructurantes orgánicos produce compost libre de fitotoxicidad (Albuquerque y col, 2006b).

El proceso de compostaje de alperujo complementado con agentes estructurantes, genera una clara disminución en la relación C/N y en el contenido de

grasas y compuestos fenólicos, lo que produce una detoxificación del material. Esta pérdida de toxicidad contribuye a la estabilidad y madurez del alperujo, lo que corrobora que los agentes estructurantes ayudan en el avance del proceso de compostaje (Alburquerque y col, 2006d). Además, el compost resultante es un material rico en materia orgánica y libre de fitotoxicidad con un alto contenido de potasio y nitrógeno orgánico, pero con bajos niveles de fósforo y micronutrientes (Figura 3), lo que permite que este material compostado sea utilizable como enmienda orgánica (Alburquerque y col, 2006b).

En este estudio se utilizará escobajo y chips de poda como agentes estructurantes. Ambos materiales presentan un tamaño adecuado que permite una correcta aireación y a la vez se optimiza la superficie de contacto con los microorganismos que se desarrollan al interior de las pilas de compostaje.

Es importante señalar, que al ser materiales leñosos son resistentes a la descomposición, lo que permite que se mantengan durante todo el proceso evitando así la compactación del residuo a compostar. Esto también ayuda a que sean materiales reciclables, pues una vez terminado el proceso de compostaje y maduración, el proceso de tamizaje (separación del material compostado mediante un tamiz, controlando la granulometría del compost obtenido y la presencia de materiales inertes o que no han terminado su proceso de compostaje) permite recuperar estos materiales y reutilizarlos en nuevas pilas de compostaje (Varnero, 2005).

Main characteristics of the mature composts (dry weight)		
Parameters	Pile 1	Pile 2
pH <sup>a</sup>	8.49	8.99
EC <sup>a</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	3.17	2.96
OM (g kg <sup>-1</sup> )	896.0	912.2
Lignin (g kg <sup>-1</sup> )	430.4	399.2
Cellulose (g kg <sup>-1</sup> )	188.1	208.0
Hemicellulose (g kg <sup>-1</sup> )	314.2	291.4
WSCH (g kg <sup>-1</sup> )	8.7	10.1
WSPH (g kg <sup>-1</sup> )	3.3	4.1
Fat content (g kg <sup>-1</sup> )	6.6	10.2
TOC (g kg <sup>-1</sup> )	470.6	484.9
TN (g kg <sup>-1</sup> )	22.7	23.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	178	185
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	61	101
C/N ratio	20.7	21.0
P (g kg <sup>-1</sup> )	1.6	1.5
K (g kg <sup>-1</sup> )	37.0	36.2
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	11.3	9.4
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	2.3	1.9
Na (g kg <sup>-1</sup> )	1.4	1.0
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	624	525
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	24	33
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	38	44
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	40	50
GI (%)	83	81

EC: electrical conductivity, OM: total organic matter, WSCH: water-soluble carbohydrates, WSPH: water-soluble phenols, TOC: total organic carbon and TN: total nitrogen.

<sup>a</sup> Water extract 1:10.

Fuente: Alburquerque y col, 2006b.

Figura 3. Características del compost maduro de "alperujo"

## 2.8 Calidad del compost

La calidad del compost se relaciona con la estabilidad biológica y madurez química que se alcanza a través del desarrollo y evolución de las diferentes etapas del proceso de compostaje.

Esto permitirá obtener un buen acondicionador orgánico de suelos, que se determinará de acuerdo a sus características físicas y químicas tales como contenido de materia orgánica, humedad, pH, relación C/N, contenido de sales, etc. Si los parámetros antes mencionados son controlados adecuadamente, se obtendrá un compost de buena calidad, libre de fitotoxicidad e higienizado.

Generalmente un compost se considera estable y maduro, cuando la temperatura termofílica interna de la pila de compostaje disminuye a nivel mesofílico, para finalmente estabilizarse a temperatura ambiente.

La Normativa Chilena de Compost- NCh 2880 (INN, 2004) establece que los materiales orgánicos compostados se pueden denominar "compost", cuando cumplen con los parámetros que definen el Índice de Madurez. Estos parámetros son:

- C/N  $\leq$  30/1: Discrimina materiales con mayor probabilidad de inmovilizar nitrógeno.
- Parámetros de estabilidad biológica: Excluyen materiales que se encuentran en activa descomposición microbiana porque contienen un nivel de carbono que sustenta la actividad microbiana.
- Parámetro de madurez química: Se evalúa la presencia de compuestos o metabolitos fitotóxicos, productos de una biodegradación que se encuentra aún en fases intermedias.

### 2.8.1 Ensayo de fitotoxicidad

Los bio-ensayos son una herramienta eficiente, rápida y relativamente económica para determinar niveles de fitotoxicidad de materias orgánicas bioprocesadas (Varnero, 2005).

Los efectos fitotóxicos de algunos materiales orgánicos son el resultado de una combinación de diversos factores, entre los cuales se puede mencionar: metales pesados, contenido de amonio, contenido de sales y ácidos grasos de bajo peso molecular. Estos compuestos pueden tener efectos inhibitorios tanto en la germinación de las semillas, como en el crecimiento de ciertas plantas (Varnero, 2005).

A través del bio-ensayo, se logra detectar la presencia de sustancias tóxicas en diversos tipos de compost y en materiales en proceso de compostaje, para lo cual se utilizan especies indicadoras sensibles, de rápido crecimiento y fácil manejo. Estas especies permiten advertir la presencia de sustancias fitotóxicas mediante los efectos negativos que provocan sobre la germinación y crecimiento de las semillas. Las especies más apropiadas para este efecto son rabanito (*Raphanus sativus*), lechuga (*Lactuca sativa*) y berro de huerto (*Lepidium sativum*) (Varnero, 2005).

La Normativa Chilena de Compost- NCh 2880 (INN, 2004) establece al rabanito como la especie adecuada para realizar estos bio-ensayos, calificando a un compost maduro si éste muestra un porcentaje de germinación igual o superior al 80%.

Se han establecido índices de germinación que permiten establecer la fitotoxicidad de los materiales compostados o en proceso de compostaje (Zuconni y col, 1981). Los Índices de germinación (Tabla 1) se obtienen a través de las siguientes ecuaciones:

Germinación relativa (GR):

$$GR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en testigo}} * 100 \quad (2.5)$$

Largo de radícula relativo (ER):

$$ER = \frac{\text{Largo promedio de radículas en extracto (cm)}}{\text{Largo promedio de radículas en testigo (cm)}} * 100 \quad (2.6)$$

Índice de germinación (IG):

$$IG = \frac{GR * ER}{100} \quad (2.7)$$

Tabla 1. Índice de germinación que indica el nivel de fitotoxicidad

Índice de Germinación	Nivel de fitotoxicidad
IG ≤ 50	Presencia de sustancias fitotóxicas.
50 < IG < 80	Presencia se sustancias fitotóxicas moderada.
IG ≥ 80	Ausencia de sustancias fitotóxicas

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Lugar de estudio**

El estudio de compostaje de alperujo para la elaboración de compost, fue realizado en la Planta Piloto de Compostaje del Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Ésta se encuentra ubicada en la comuna de La Pintana, Región Metropolitana (33° 34' Latitud Sur y 70° 38' Longitud Oeste). El estudio en terreno tuvo una duración aproximada de cinco meses, entre Octubre-2006 y Marzo 2007.

#### **3.2 Materiales y métodos**

##### **3.2.1 Materias primas y recursos**

Se realizaron cuatro procesos de compostaje de alperujo con distintos tratamientos, en los cuales se utilizó alperujo (AL), chips de poda (ChP) y escobajo (ES) como materias primas, de los cuales los últimos dos fueron utilizados como agentes estructurantes.

El alperujo (Figura 4) utilizado fue proporcionado por "Comercial y Agroindustria Soho S.A." (Maipo), los chips de poda fueron proporcionados por La Ilustre Municipalidad de La Pintana (Santiago) y el escobajo fue proporcionado por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (Santiago).



Figura 4. Alperujo puro

El proceso de compostaje se realizó en un área cercada, aproximadamente de 600 m<sup>2</sup>.

Las herramientas que se utilizaron en el trabajo en terreno con las pilas de compostaje fueron: trompo eléctrico (para mezclar material), pala, rastrillo, carretilla y una manguera para el riego de las pilas.

Previo a la preparación de las pilas, se realizó una caracterización de cada una de las materias primas. Posteriormente a la formación de las pilas, se realizaron análisis en el material en proceso de compostaje.

### 3.2.2 Diseño de las pilas de compostaje

Se realizaron cuatro tratamientos (Tabla 2) para elaborar compost, a partir de las materias primas antes mencionadas. Esto se llevo a cabo mediante la formación de pilas de compostaje.

Tabla 2. Tratamientos

TRATAMIENTO	PILA
T1 (Testigo)	100% Alperujo (sin agente estructurante), con volteo.
T2	100% Alperujo, con aireación forzada
T3	Alperujo : Chips de poda, con volteo
T4	Alperujo : Escobajo, con volteo

Para cada tratamiento se construyeron tres pilas (triplicados), cada una de ellas con un volumen de 1 m<sup>3</sup>. Excepto el tratamiento T2 (aireación forzada) que sólo contó con una pila de 3 m<sup>3</sup>. De esta manera, el estudio presentó un total de 10 pilas de compostaje (Figura 5).

Las pilas de 1 m<sup>3</sup> fueron tratadas con sistemas de volteos, constituidas por AL:ChP y AL:ES, con una relación en volumen de alperujo: agente estructurante igual a 3:1, más un tratamiento testigo sólo con AL. La pila de 3 m<sup>3</sup> fue tratada con un sistema de aireación forzada y estuvo constituida sólo con AL.



Figura 5. Pilas en proceso de compostaje

En el caso de las pilas estáticas con volteo, éstos se realizaron en forma periódica en función de la temperatura, con el objeto de introducir el material de la parte externa al interior de la pila y compostar así toda la masa por igual.

Para el tratamiento con aireación forzada, se utilizó un sistema que consta de una caja metálica, la que tiene adosado en un extremo un extractor de aire, el cual funciona en forma intermitente con la ayuda de un timer y en el otro extremo consta de tres tubos de PVC de 12 cm de diámetro y 4 metros de largo cada uno. Estos tubos tienen además, orificios en forma regular cada 20 cm (figuras 6 y 7). El nivel de aireación adecuado que se aplicó, en función de la temperatura, fue de 300 m<sup>3</sup> de aire al día, lo cual equivale a 15 minutos por día de funcionamiento del extractor.



Figura 6. Sistema de aireación forzada

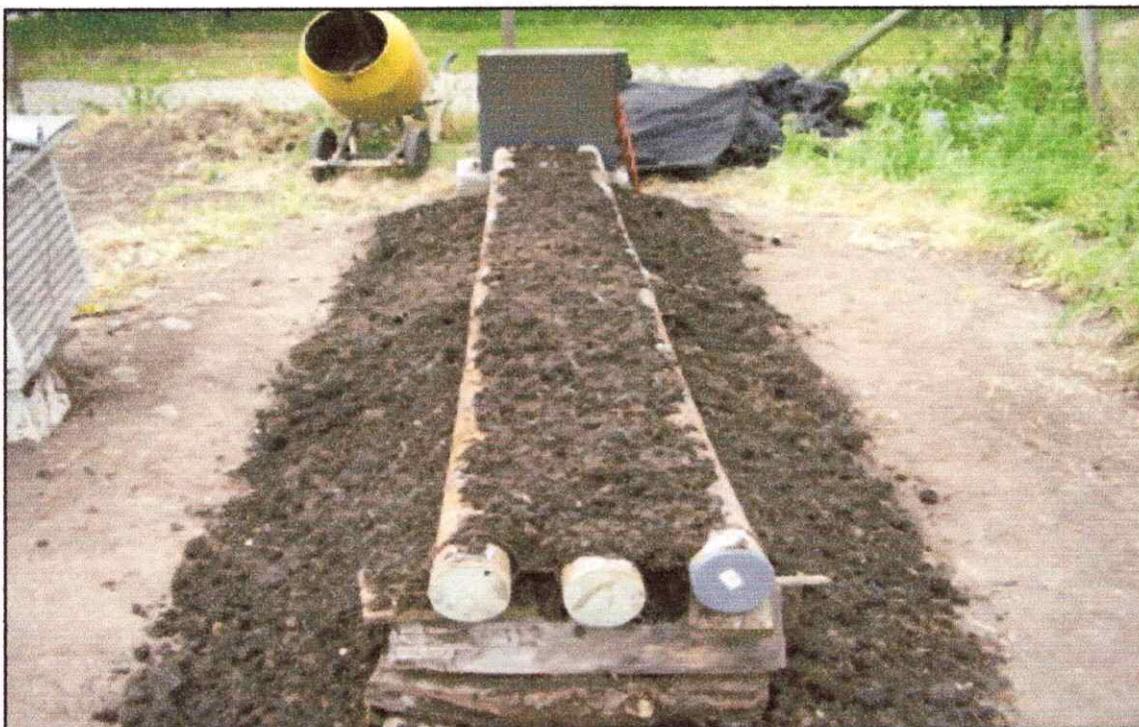


Figura 7. Pila de alperujo con sistema de aireación forzada

El procedimiento de riego fue similar en las tres pilas de un mismo tratamiento (T1, T3, T4) y en el caso del tratamiento T2, a lo largo de la única pila. Cabe hacer notar que, no todos los tratamientos recibieron los mismos riegos, pues las tres pilas de los tratamientos T1, T3 y T4 y la pila del tratamiento T2, se regaban de acuerdo a un control de humedad empírico, que consistía en determinar con el tacto el contenido de humedad. De esta manera, las pilas se regaban a intervalos cortos, cuando el material no goteaba al apretarlo firmemente con la mano y al abrir el puño permanecía moldeado.

Con este control de humedad se trató de mantener el porcentaje de humedad entre un 45 – 55 %, que se considera favorable para la actividad microbiana. Las pilas no fueron cubiertas con mallas.

### **3.2.3 Control y medición del material en proceso de compostaje**

Para el análisis de los materiales de las pilas en proceso de compostaje, se tomaron 3 sub-muestras en distintos puntos de éstas, obteniéndose una muestra compuesta de 1 kg. Con este procedimiento se obtuvieron muestras representativas, a partir de las cuales se realizaron variados análisis, con el objetivo de caracterizar los distintos tratamientos estudiados. A continuación se describen los análisis.

#### **3.2.3.1 Propiedades físicas**

Con las muestras obtenidas, se registraron distintas propiedades físicas como temperatura, contenido de agua y densidad.

### 3.2.3.1.1 Temperatura

La temperatura se midió diariamente utilizando dos termómetros digitales. Cada lectura registrada es el promedio de mediciones tomadas en distintos lugares de las pilas en tratamientos. En el caso de las pilas con volteo de 1 m<sup>3</sup> de volumen, la temperatura se midió en seis puntos; 5 puntos a 20 cm de profundidad y 1 punto a 40 cm de profundidad. Mientras que en la pila con aireación forzada la temperatura se midió en 16 puntos; 12 puntos a 20 cm de profundidad y 4 puntos a 40 cm de profundidad.

Se introdujo el vástago del termómetro y se espero un tiempo adecuado para permitir la estabilización de la temperatura y se registró el valor obtenido (Figura 8). La temperatura se midió en la mañana a la misma hora, de modo de evitar la influencia de la temperatura ambiental en las pilas.

### 3.2.3.1.2 Medición del contenido de agua (humedad)

La medición del contenido de agua se realizó en las materias primas y en forma periódica en las pilas con los distintos tratamientos. Ésta se realizó mediante el método gravitatorio a 70±5 °C hasta masa constante. TMECC 03.09 (TMECC, 2004).

El procedimiento para conocer la humedad del material fue el siguiente:

1. Se pesaron 10 gramos de la muestra a analizar.
2. Se colocó la muestra en una cápsula de aluminio previamente pesada.
3. La muestra se llevó a la estufa de secado a 70±5 °C hasta masa constante.
4. Se volvió a pesar la muestra seca.

La humedad se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} * 100 \quad (3.1)$$

Donde:

$P_1$  = peso de la cápsula

$P_2$  = peso de la cápsula con la muestra sin secar

$P_3$  = peso de la cápsula con la muestra seca

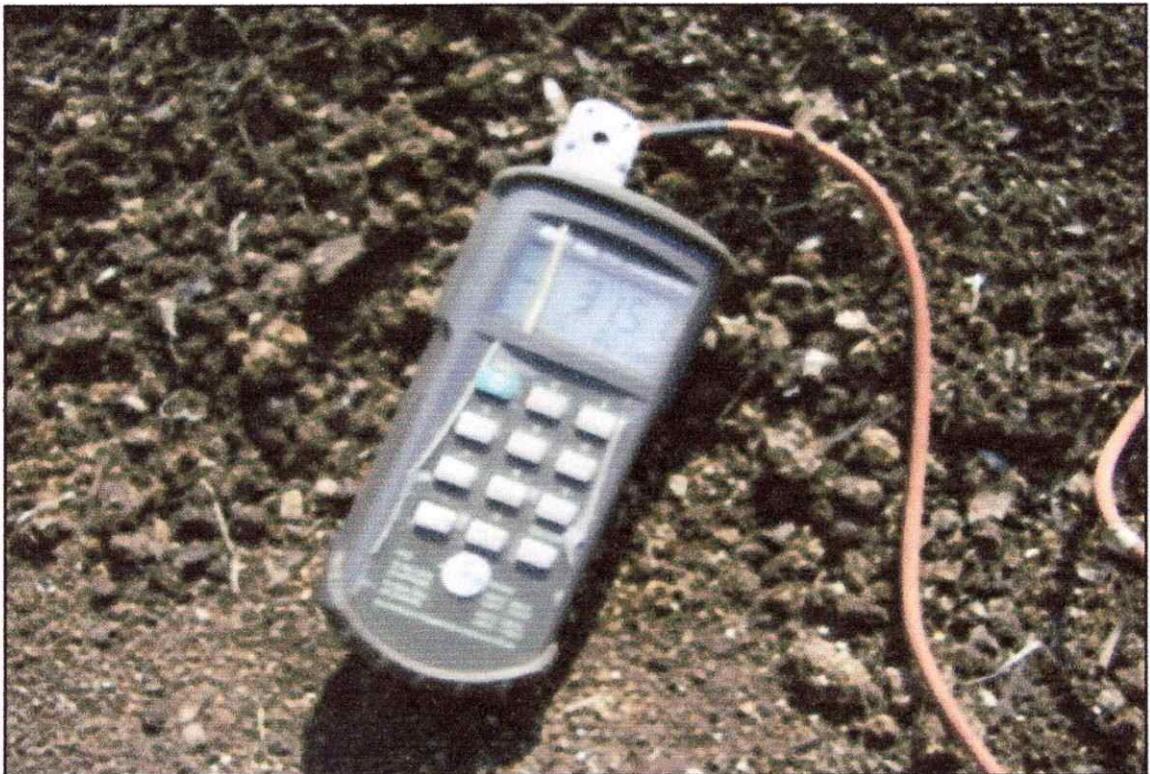


Figura 8. Termómetro midiendo la temperatura interna de una pila de compost

### 3.2.3.1.3 Densidad

La densidad se midió en las materias primas y cada semana en el material de las pilas en compostaje. Cabe mencionar, que todas las mediciones fueron realizadas con material seco.

En las materias primas, la densidad se determinó mediante el uso de un recipiente de volumen conocido (20 litros), al cual se agregó el material respectivo sin presionarlo ni compactarlo. Posteriormente se pesó el material contenido en dicho recipiente.

En el caso de los materiales en proceso de compostaje, se utilizó un vaso de precipitado de 500 cm<sup>3</sup>. A este recipiente se le agregó la muestra analizar, de modo de enrasar el recipiente con el material, sin presionarlo ni compactarlo. Posteriormente se pesó la muestra contenida en el vaso de precipitado y se registraron los datos.

### 3.2.3.2 Propiedades químicas

A partir de las muestras obtenidas, se midieron propiedades químicas como pH, CE, MO, carbono orgánico, nitrógeno total, potasio total y fósforo total.

#### 3.2.3.2.1 Medición de pH

La medición de pH se realizó en las materias primas y cada semana en el material en compostaje, pues esta propiedad fue utilizada como indicador del proceso.

El método utilizado para el análisis de pH, fue TMECC 04.11 (TMECC, 2004). Se debe mencionar, que el método tiene una modificación respecto a la relación del

material compostado/agua. La relación utilizada en los análisis realizados con agua destilada fue de 1:10, debido a la capacidad de absorción de agua que poseen los restos de poda y el alperujo utilizados como materias primas.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se secó la muestra a analizar por 24 hrs. en estufa de secado a  $70 \pm 5$  °C.
2. Se pesaron 10 gramos del material seco a analizar.
3. Se colocó el material en un vaso de precipitado y se añadieron 100 ml de agua destilada.
4. Se agitó la mezcla mecánicamente por 15 minutos y posteriormente se filtró el líquido.
5. Se midió el extracto acuoso con un pHmetro previamente calibrado y se registro la medición.

#### 3.2.3.2.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se midió en las materias primas utilizadas en la formación de las pilas y cada semana en el material en proceso de compostaje, mediante el método TMECC 04.10 (TMECC, 2004).

Se utilizó un conductímetro, previamente calibrado, y la celda de conductividad se introdujo en el mismo extracto acuoso con el que se determinó el pH.

#### 3.2.3.2.3 Materia orgánica y carbono orgánico

El método utilizado para el análisis de materia orgánica fue el TMECC 05.07-A. (TMECC, 2004).

Este método consistió en medir el contenido de cenizas por pérdida de peso, luego de realizar una calcinación del material a 600 °C.

Este análisis se realizó en las materias primas y se midió cada semana durante el proceso de compostaje.

El método se describe a continuación:

1. Se secó la muestra a analizar por 24 hrs. en estufa de secado a 70±5 °C.
2. Se pesaron los crisoles sin las muestras y posteriormente se agregaron 10 gramos del material seco a analizar.
3. Las muestras contenidas en los crisoles se llevaron a una mufla a 600 °C, donde se realizó una calcinación durante dos horas.
4. Posterior a la calcinación se dejaron los crisoles en la mufla apagada, por 12 horas (evitando exponerlos a la humedad ambiente) y luego se pesaron con las muestras contenidas en ellos.

El porcentaje de materia orgánica se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$MO(\%) = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} \quad (3.2)$$

Donde:

$P_1$  = peso crisol

$P_2$  = peso del crisol con la muestra sin calcinar

$P_3$  = peso del crisol con la muestra calcinada

El porcentaje de carbono orgánico se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$CO(\%) = \frac{MO}{1,8_{mo}} \quad (3.3)$$

Donde:

MO = materia orgánica

#### 3.2.3.2.4 Nitrógeno total, potasio total y fósforo total.

Los contenidos de nitrógeno, potasio y fósforo total, fueron medidos en las materias primas y en ciertas muestras en proceso de compostaje, definidas de acuerdo a la curva de temperatura interna de la pila de compostaje. El procedimiento para seleccionar las muestras que fueron analizadas, se determinó de acuerdo a aquellos días en que las pilas presentaron un aumento o disminución de temperatura significativo, en el proceso de compostaje.

Los análisis de nitrógeno, potasio y fósforo total, fueron realizados en AGROLAB. El contenido de nitrógeno total se determinó mediante el método TMECC 04.02-D. El contenido de potasio total y fósforo total fue medido mediante el método TMECC 04.04-A y TMECC 04.03-A, respectivamente (TMECC, 2004).

#### 3.2.3.3 Propiedades biológicas

##### 3.2.3.3.1 Ensayo de fitotoxicidad

El objetivo de este bio-ensayo es determinar el efecto del material en proceso de compostaje sobre la germinación y crecimiento de ciertas semillas, de manera tal de analizar la estabilidad y madurez del producto en compostaje. Las semillas

escogidas fueron de lechuga (*Lactuca sativa* var. Batavia dorada de primavera) y rabanito (*Raphanus sativus* var. Cherry belle).

El método utilizado para el análisis de fitotoxicidad fue el TMECC 05.05 (TMECC, 2004), utilizando una relación sólido / agua destilada de 1:10, debido a las características propias de las materias primas. Este análisis se realizó en las materias primas y cada un mes en el material en proceso de compostaje.

El procedimiento para el análisis de fitotoxicidad fue el siguiente:

1. Se pesaron 10 gramos del material a analizar.
2. Se colocó el material en un frasco y se añadió agua destilada en la proporción sólido / agua destilada 1:10.
3. Se taparon los frascos previa agitación mecánica y se dejaron reposar durante 3 hrs. para asegurar la solubilización de compuestos desde los materiales analizados.
4. Posteriormente se filtró el extracto del frasco.
5. Se habilitaron placas Petri con papel filtro en el fondo y se colocaron sobre éstos, 10 semillas de la especie utilizada (rabanito y lechuga). Se realizaron triplicados por cada muestra.
6. Se añadieron a cada placa Petri 10 ml del extracto obtenido y se dejaron a  $25 \pm 2$  °C durante 72 horas (figuras 9 y 10).
7. Como testigo se utilizaron dos placas Petri con papel filtro en el fondo. En cada placa Petri, se colocaron 10 semillas de rabanito o lechuga respectivamente y se les añadió 10 ml de agua destilada. Posteriormente se dejaron a  $25 \pm 2$  °C durante 72 horas.



Figura 9. Bio-ensayo de fitotoxicidad con semillas de rabanito



Figura 10. Bio-ensayo de fitotoxicidad con semillas de lechuga

#### 3.2.3.4 Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con los datos de contenido de materia orgánica, nitrógeno total, pH y conductividad eléctrica, para determinar si se presentaron diferencias significativas en las características de los productos obtenidos por los diferentes tratamientos al finalizar el estudio. El porcentaje de confiabilidad utilizado fue de un 95%.

Posteriormente se realizaron pruebas de comparaciones múltiples (Prueba de Tukey) para la comparación de los tratamientos, cuando existieron diferencias significativas, utilizando un nivel de significancia del 95% (Canals e Iriarte, 2004).

## IV. RESULTADOS

### 4.1 Propiedades físicas

#### 4.1.1 Temperatura

Las mediciones diarias de la temperatura interna de las pilas en proceso de compostaje, señalaron que la fase termofílica del proceso se alcanzó durante la primera semana de compostaje en los tratamientos con agentes estructurantes (T3 y T4). Por su parte los tratamientos T1 y T2 alcanzaron esta fase después de la tercera semana de compostaje (Figura 11).

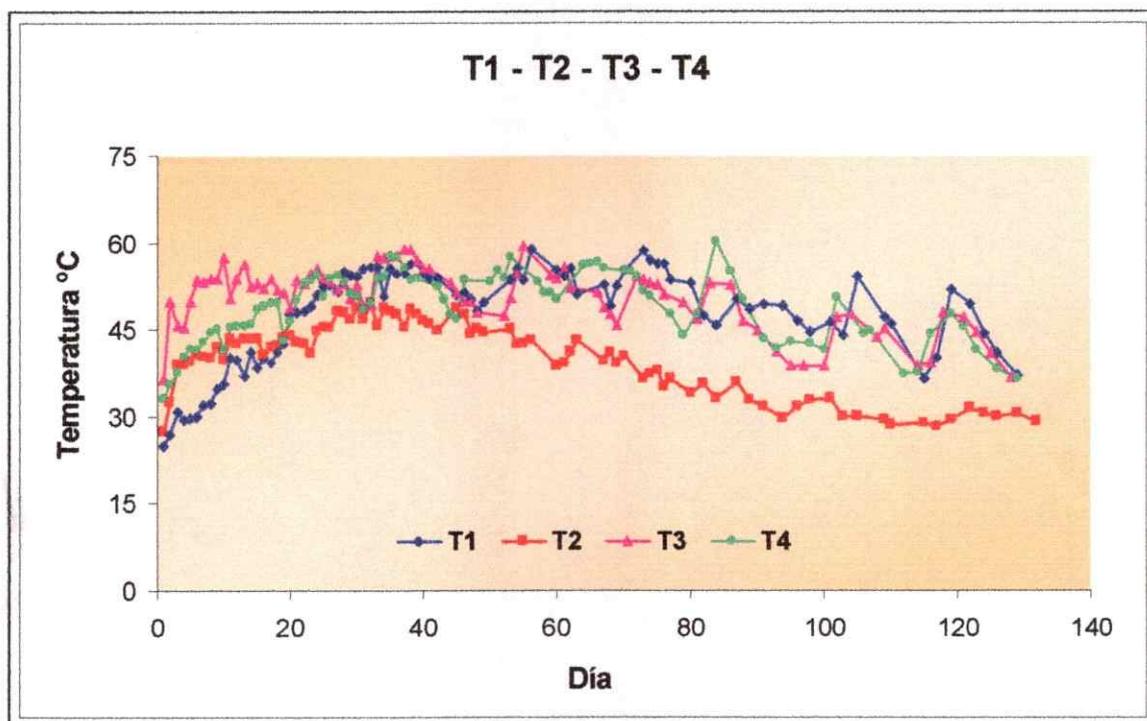


Figura 11. Evolución de la temperatura en los tratamientos

No se observaron temperaturas superiores a 70 °C que pudieran inhibir la actividad microbiana. Las temperaturas máximas alcanzadas en el tratamiento T3, durante los primeros diez días, corresponden a la intensa actividad degradativa por parte de los microorganismos termofílicos sobre los compuestos menos resistentes a la descomposición.

En los tratamientos T1, T3 y T4 se observó la aparición de hongos aproximadamente al séptimo día de tratamiento, cuando la temperatura se encontraba entre los 30 y 50 °C. Estos hongos predominaron principalmente a los 30 cm de profundidad y presentaron un color blanco.

En el tratamiento T3, la temperatura se mantuvo sobre los 45 °C durante 90 días aproximadamente. En el caso del T4, la fase termofílica se extendió por 80 días, mientras que en el tratamiento T1 ésta fase duró 100 días aproximadamente (Tabla 3, Apéndice I). Estos amplios periodos en rangos termofílicos reflejan que esta fase es muy extensa para este tipo de residuo, debido a los compuestos lipídicos y ácidos orgánicos que presenta. Sin embargo, el tratamiento T2 (alperujo con aireación forzada), tiene aproximadamente una fase termofílica de 30 días (Figura 11) (Tabla 3, Apéndice I), lo que evidencia que hay una diferencia con el resto de los tratamientos en el compostaje de alperujo, ya que este sistema no es el más adecuado para estos tipos de residuos que tienden a compactarse y formar conglomerados que impiden una adecuada aireación, lo que repercute directamente en el descenso de la temperatura. Por el contrario en los tratamientos T1, T3 y T4 con sistema de volteo, existió una mayor oxigenación, lo cual intensificó la acción de los microorganismos termofílicos, favoreciendo las altas temperaturas en las pilas de compostaje (Figura 11).

En los tratamientos T1, T3 y T4, se completó la fase de latencia y crecimiento. Se observó además que estos tratamientos, presentaron una tendencia a la fase de maduración, pues las temperaturas comenzaron a disminuir paulatinamente (enfriamiento), aunque, este enfriamiento se presentó primero en el tratamiento T3. Es necesario señalar, que el enfriamiento es un aspecto decisivo para la maduración y eliminación de microorganismos patógenos del material compostado final.

Los picos de temperatura que se observaron en los tratamientos T1, T3 y T4 son producto de los volteos realizados en las pilas, que desencadenan alzas de temperaturas con posteriores descensos de las mismas. Estas alzas y posteriores descensos no se observaron en el tratamiento T2 con aireación forzada (Figura 11).

La temperatura interna de las pilas, presentó una variación según la profundidad. En los cuatro tratamientos, la temperatura fue mayor a los 40 cm que a los 20 cm de profundidad (figuras 12, 13, 14 y 15). En los tratamientos T1, T3 y T4 esta tendencia se produjo a partir de la tercera semana de formación de las pilas, pues se observó, que a los 40 cm la temperatura era aproximadamente 13 °C más alta que a los 20 cm de profundidad.

Sin embargo, hacia el periodo final del proceso, la temperatura comenzó a igualarse (figuras 12, 14 y 15). En el caso del tratamiento T2 no se observó dicho comportamiento, pues la mayor diferencia en las temperaturas respecto a la profundidad, se produjo al día 105 de tratamiento (Figura 13).

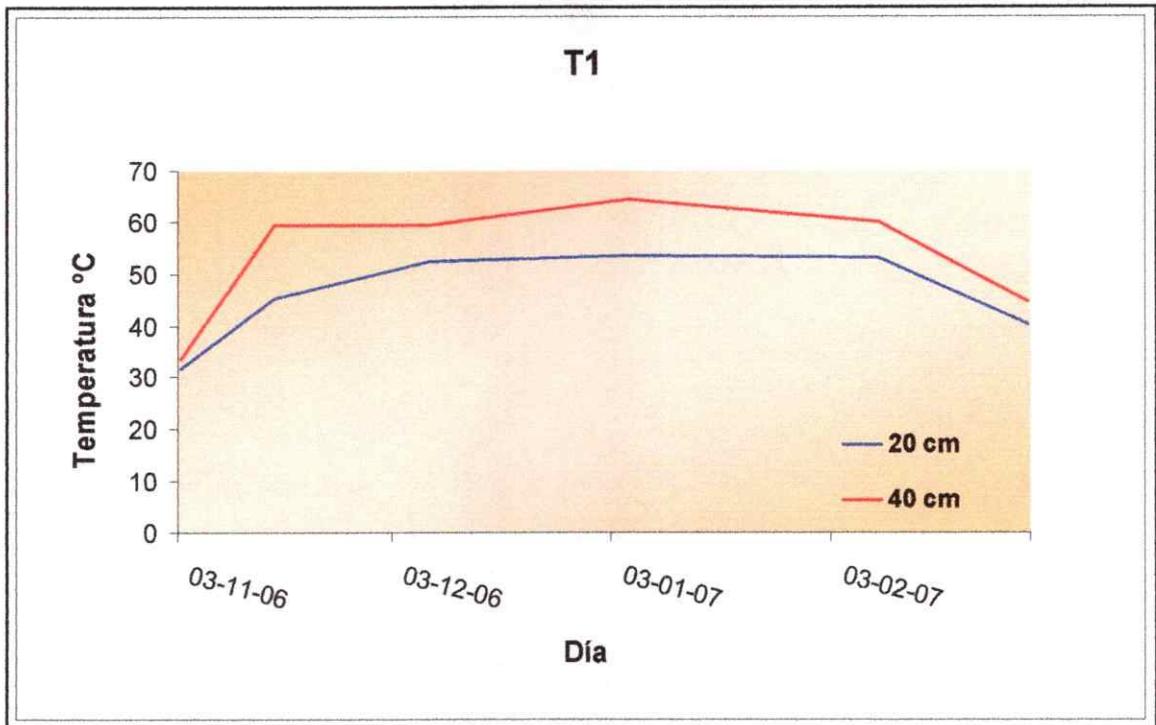


Figura 12. Temperatura del tratamiento T1 a distintas profundidades de la pila

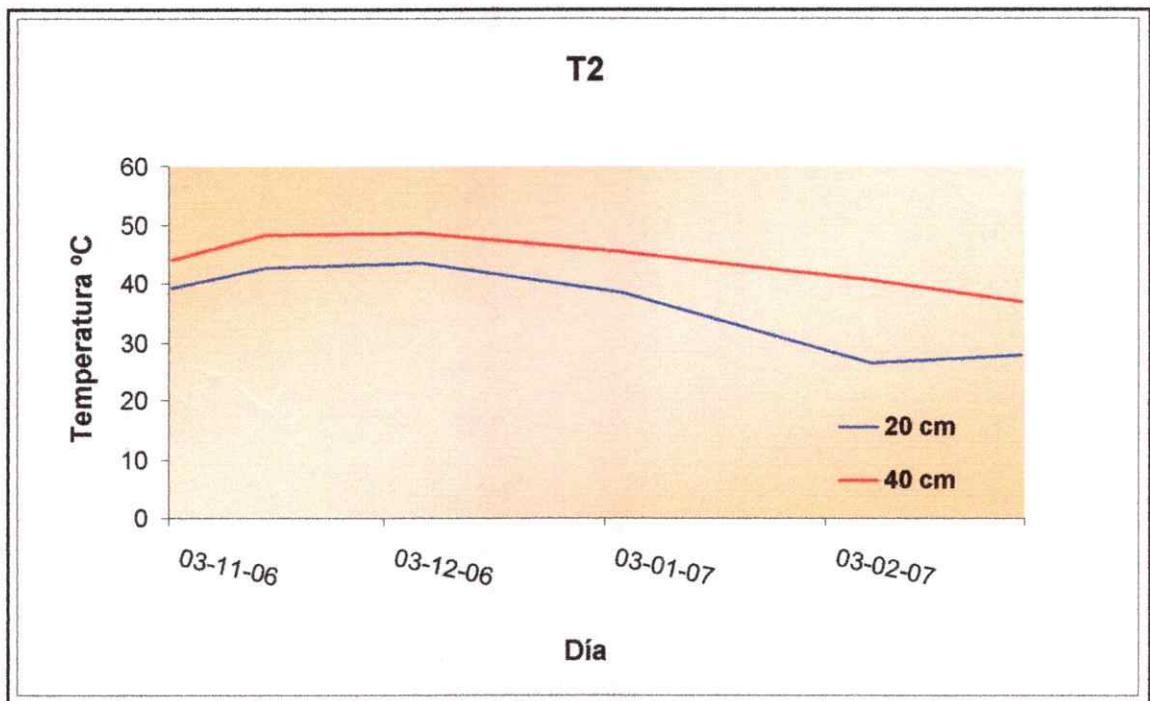


Figura 13. Temperatura del tratamiento T2 a distintas profundidades de la pila

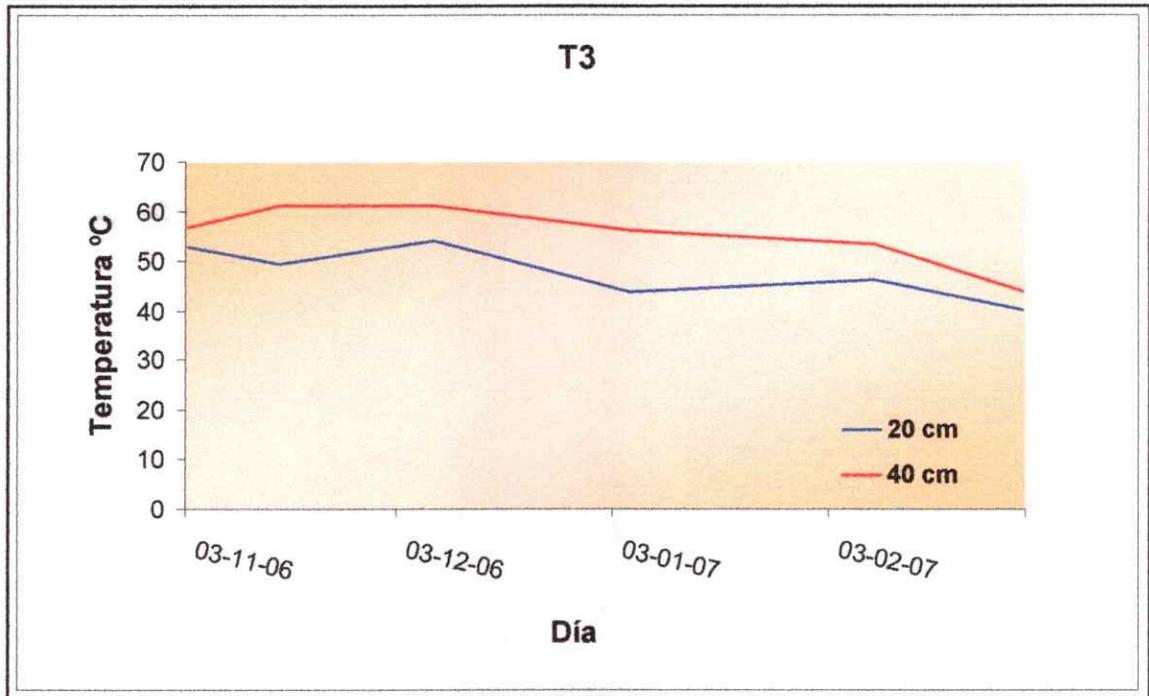


Figura 14. Temperatura del tratamiento T3 a distintas profundidades de la pila

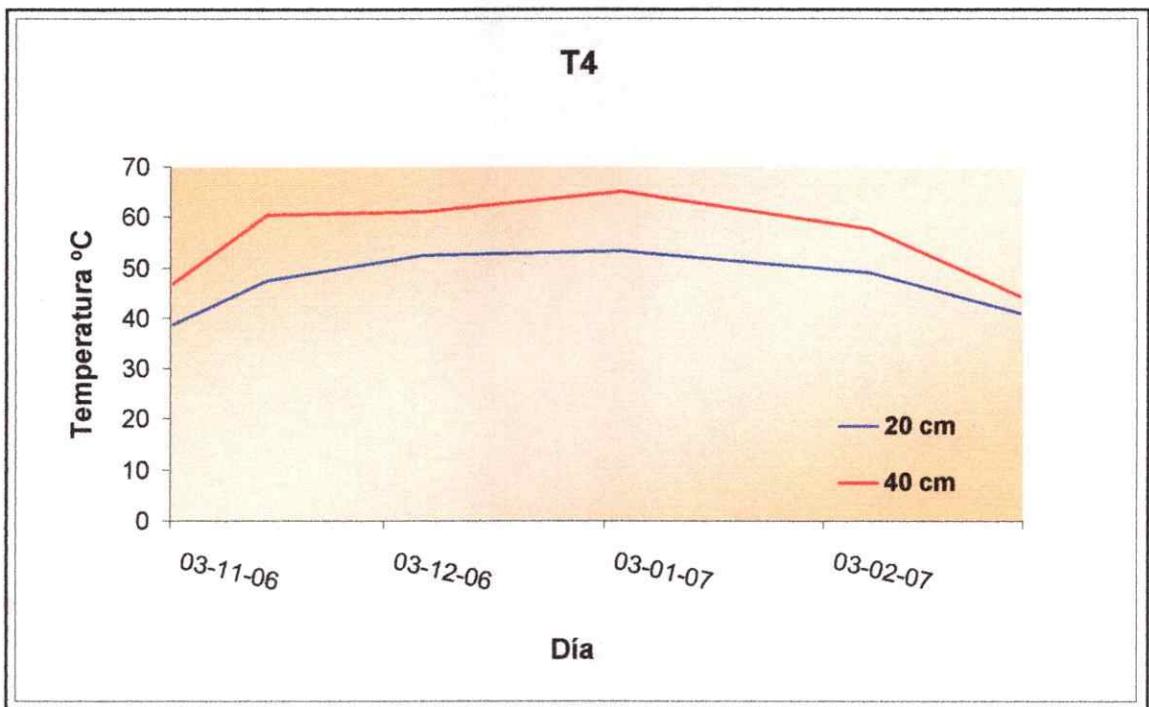


Figura 15. Temperatura del tratamiento T4 a distintas profundidades de la pila

#### 4.1.2 Humedad

El porcentaje de humedad en las materias primas fueron los siguientes: alperujo 48%, chips de poda 12% y escobajo 10%. Los bajos contenidos de humedad que se obtuvieron en las materias primas, se debe a que estos residuos se almacenaron sin riego y posteriormente se realizó el armado de pilas de compostaje y análisis respectivos.

Al séptimo día de formación de las pilas, el contenido de humedad fue diferente. En los tratamientos T1 y T2 se obtuvo un porcentaje de humedad de un 42%, esto se debe a que ambos tratamientos poseen solo alperujo, por ende su humedad es similar. En el caso del tratamiento T3 la humedad fue de un 35%, mientras que en el tratamiento T4 fue de un 37%. En los tratamientos T3 y T4 la humedad fue similar pues ambos, además de alperujo, contenían materiales estructurantes que absorbían agua.

Según la Norma de compost (NCn 2880), un producto totalmente compostado debe tener entre un 30% y 45% de humedad, base seca. Al día 112 (cuarto mes de tratamiento), los tratamientos T3 y T4, presentaban porcentajes de humedad establecidos por la norma de compost. Estos porcentajes fueron respectivamente 34% y 38%.

El contenido de humedad se controló periódicamente pues el ensayo se realizó en meses de verano, donde las altas temperaturas influyeron en la evaporación de

agua desde la superficie de las pilas. Por ende, el contenido de agua es una variable que fluctuó constantemente.

#### 4.1.3 Densidad

La densidad es la relación entre la masa de un material y el volumen que ocupa dicho material. Los valores de este parámetro para las materias primas (previo a la formación de las pilas) fueron las siguientes: alperujo  $0,44 \text{ kg L}^{-1}$ ; chips de poda  $0,21 \text{ kg L}^{-1}$ ; escobajo  $0,04 \text{ kg L}^{-1}$ .

Las densidades de los tratamientos al comienzo del proceso fueron las siguientes: T1  $0,45 \text{ kg L}^{-1}$ ; T2  $0,46 \text{ kg L}^{-1}$ ; T3  $0,39 \text{ kg L}^{-1}$ ; T4  $0,42 \text{ kg L}^{-1}$ . Los resultados obtenidos muestran que T1 y T2 son los tratamientos que presentaron mayores densidades iniciales, debido a que las pilas sólo estaban formadas con alperujo. En tanto, los tratamientos T3 y T4 presentaron menores densidades, ya que en estas pilas el alperujo se mezcló con agentes estructurantes, los que poseían menores densidades.

En la Figura 16, se observa que en todos los tratamientos se produjo un aumento en la densidad. De esta forma, en los tratamientos T1 y T3 las densidades se incrementaron en un 40% y 38% respectivamente, llegando a obtener densidades del orden de  $0,63 \text{ kg L}^{-1}$  y  $0,54 \text{ kg L}^{-1}$  respectivamente. En el caso del tratamiento T4 hubo un aumento de un 19%, obteniéndose una densidad aproximada de  $0,50 \text{ kg L}^{-1}$ . Mientras que el tratamiento T2 tuvo el más bajo aumento, el cual correspondió a un 11% obteniéndose finalmente una densidad de  $0,51 \text{ kg L}^{-1}$ .

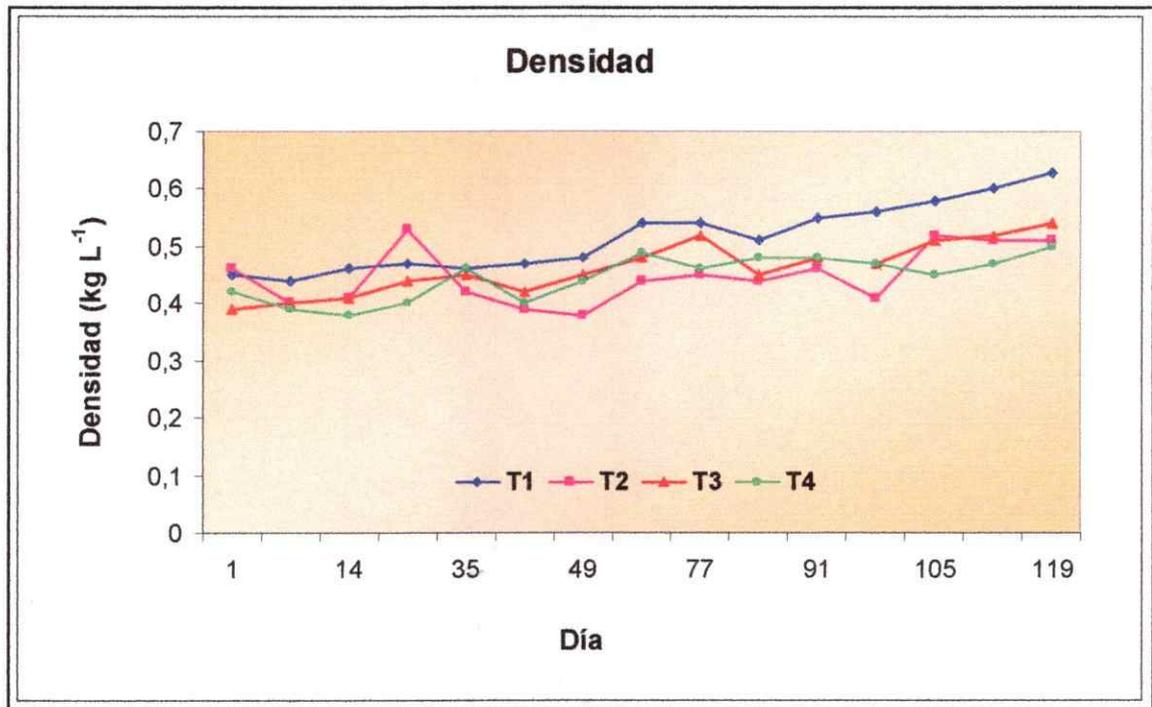


Figura 16. Evolución de la densidad durante el proceso de compostaje

## 4.2 Propiedades químicas

### 4.2.1 pH

Las mediciones de pH de las materias primas fueron las siguientes: alperujo 5,02; chips de poda 5,76; escobajo 7,26.

El pH inicial en los cuatro tratamientos fue ligeramente ácido, gracias al aporte en mayor porcentaje de alperujo. Durante los primeros 21 días del proceso, se observó una disminución de este valor en todos los tratamientos analizados (Figura 17). La disminución del pH en los primeros días del proceso, se pudo deber a la liberación de ácidos orgánicos y ácidos grasos volátiles, producidos por la actividad microbiana.

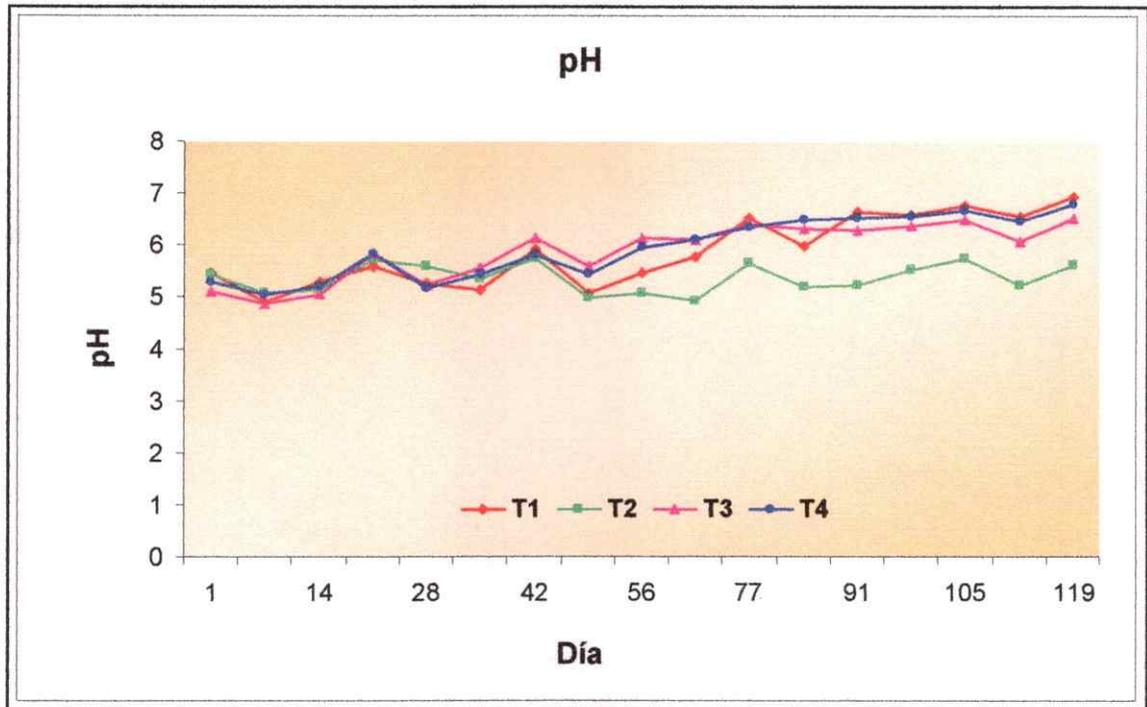


Figura 17. Evolución del pH durante el proceso de compostaje

Producto que en los tratamientos T1, T3 y T4 se realizaron volteos periódicamente, no se tuvo problemas de anaerobiosis significativos, que pondrían haber ocasionado la eliminación de microorganismos benéficos en el proceso de compostaje. Por otra parte, tampoco se observó un aumento excesivo de pH, ya que durante el proceso ninguno de los tratamientos sobrepasó el valor 6,95 lo que podría haber provocado la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco gaseoso produciendo olores desagradables y la disminución de un nutriente esencial en el producto final (Santibáñez, 2002).

Sin embargo, en todos los tratamientos se observó un incremento de pH durante el compostaje del alperujo (Tabla 4, Apéndice II). De esta manera, al finalizar el estudio se obtuvieron los valores de pH que se muestran en la Figura 18.

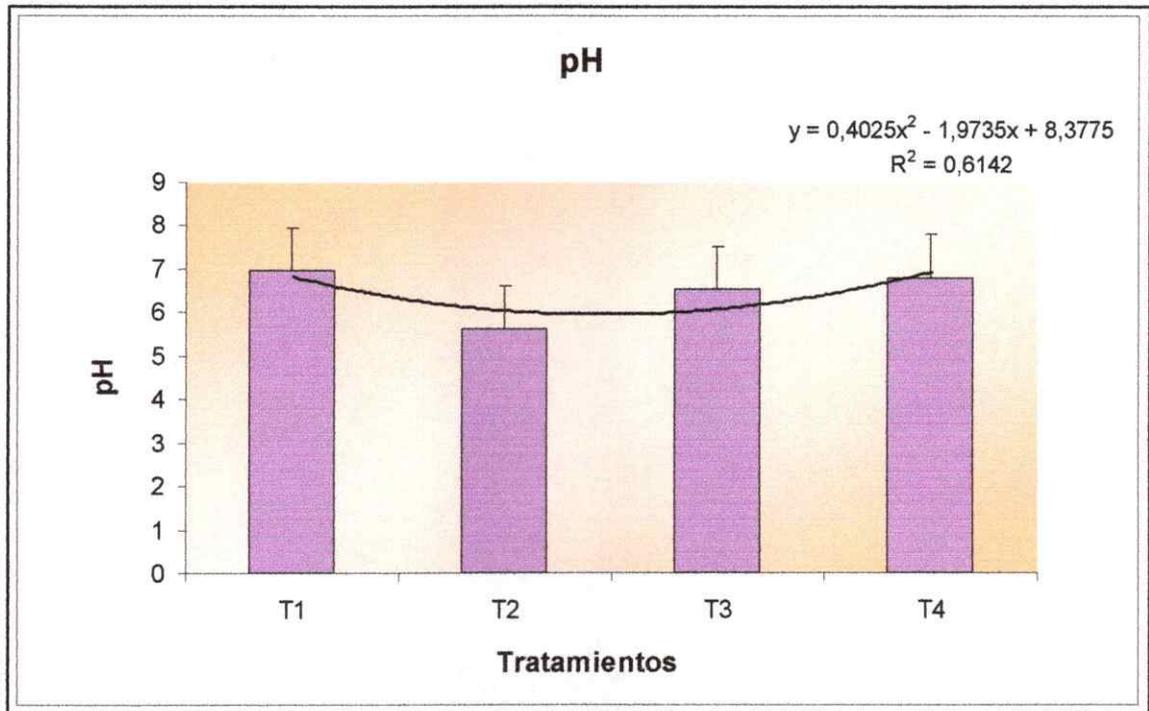


Figura 18. pH de los tratamientos al día 119 de compostaje

Estos datos están dentro del rango de la neutralidad, a excepción del tratamiento T2 que es ligeramente ácido, y a pesar de que estos materiales no se encuentran compostados completamente se ajustan a los valores que exige la normativa de compost, NCh 2880: pH 5,0 – 8,5.

Se debe mencionar, que el tratamiento T2 presentó el menor incremento de pH durante el proceso analizado, así como también obtuvo el valor más bajo de este parámetro al finalizar el estudio. Los análisis estadísticos confirman lo señalado anteriormente, pues el producto del tratamiento T2 (aireación forzada), es significativamente distinto a los otros tratamientos, presentando el menor valor de pH. Esto se puede explicar, ya que en este tratamiento se utilizó el sistema de aireación forzada (sin volteo), lo que favoreció la compactación del alperujo. Esta compactación

del material podría haber producido un ambiente con baja concentración de oxígeno, generando condiciones reductoras, que podrían haber incidido en el pH relativamente ácido obtenido en este tratamiento.

#### **4.2.2 Conductividad eléctrica**

Las conductividades eléctricas de las materias primas fueron las siguientes: alperujo 1,21 dS/m; chips de poda 0,68 dS/m; escobajo 0,38 dS/m.

En todos los tratamientos estudiados, la conductividad eléctrica disminuye en el tiempo (Figura 19) (Tabla 5, Apéndice II). Esta disminución se puede deber, a que los cationes generados en los materiales analizados son adsorbidos en el complejo de intercambio.

En la Figura 20 se observa que, al finalizar el estudio de compostaje todos los tratamientos presentaron valores de conductividad eléctrica menores a 1 dS/m, siendo el tratamiento T2, el que presentó el valor más bajo de este parámetro. No obstante, el análisis estadístico demostró que no existen diferencias significativas entre los productos obtenidos de los cuatro tratamientos, al finalizar el estudio.

A pesar de no encontrarse completamente compostados los valores se ajustan a lo que establece la Norma Chilena de Compost (NCh 2880), pues la conductividad eléctrica para un compost de Clase A debe ser menor a 3 dS/m.

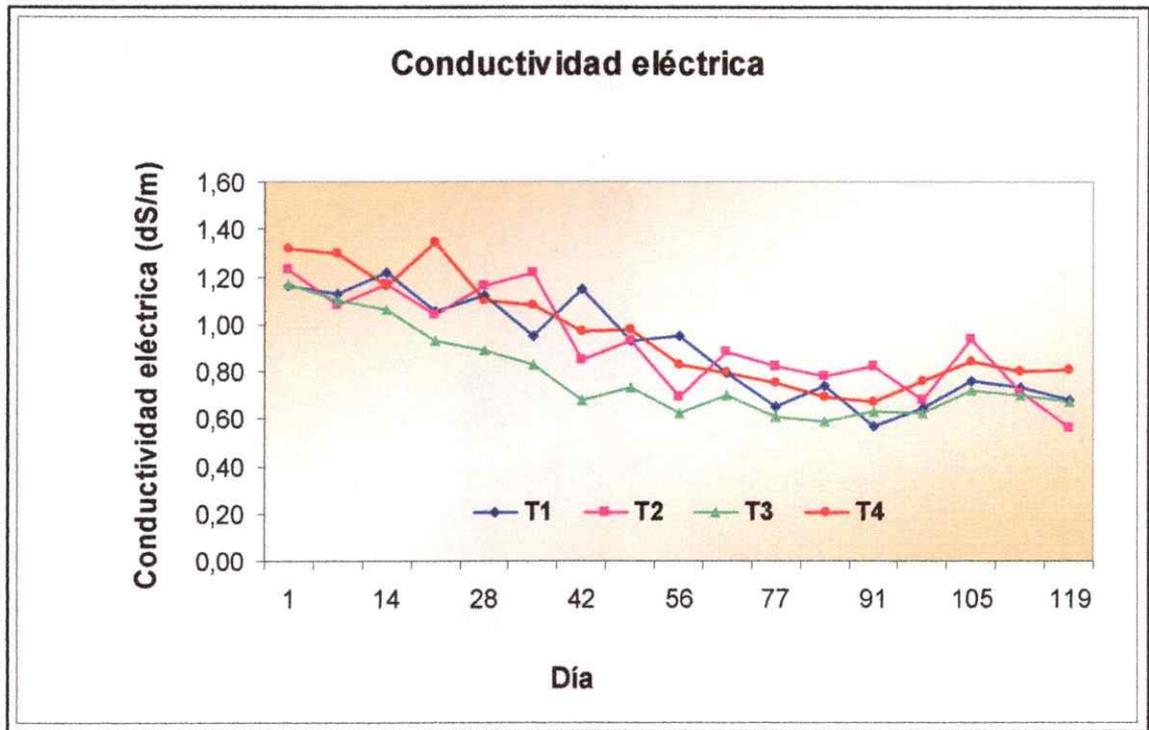


Figura 19. Conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje

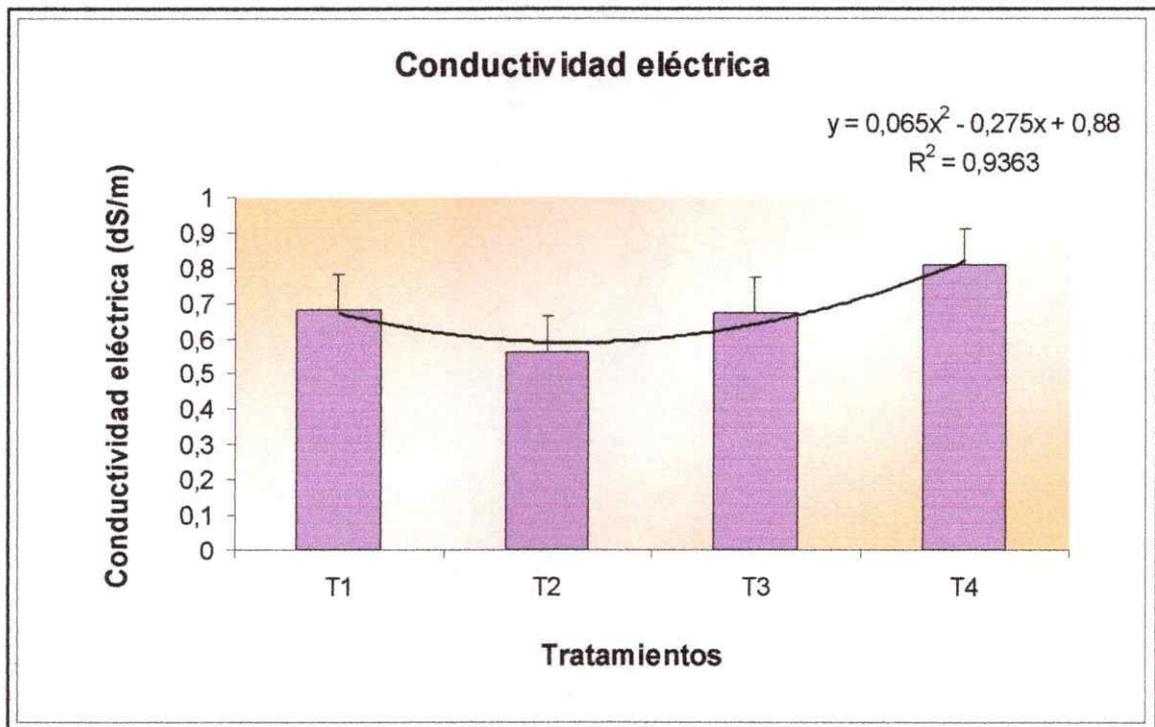


Figura 20. Conductividad eléctrica de los tratamientos al día 119 de compostaje

### 4.2.3 Materia orgánica

La materia orgánica disminuyó durante el proceso de compostaje, debido a las reacciones de descomposición aeróbica que generan principalmente dióxido de carbono y agua.

Las materias primas utilizadas para formar las pilas presentaron valores altos de materia orgánica. La cantidad de materia orgánica que contenían éstas, fueron las siguientes: alperujo 773,1 g/kg; chips de poda 931,10 g/kg; escobajo 886,15 g/kg.

En la Figura 21, se observa una disminución en el valor de la materia orgánica en los tratamientos T1, T3 y T4, siendo esta disminución más pronunciada en las primeras semanas del proceso de compostaje. Sin embargo, en el tratamiento T2 (Figura 21) no se observa una disminución clara de la materia orgánica, lo que podría deberse a los problemas de compactación que impiden un adecuado proceso de degradación (Tabla 6, Apéndice III).

Los análisis estadísticos demostraron que no existen diferencias significativas, respecto al contenido de materia orgánica, entre los materiales de los tratamientos T1, T3 y T4. No así en relación al tratamiento T2, con el cual si se presentaron diferencias significativas, lo que se debe a la incorrecta degradación del material en este tratamiento.

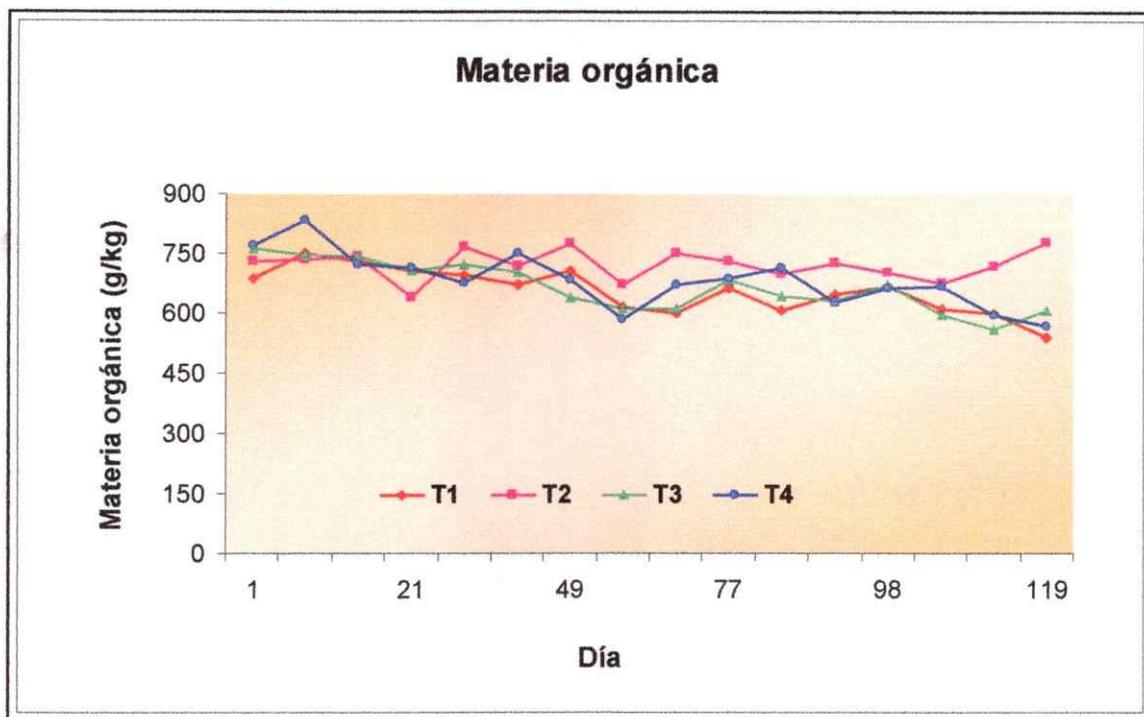


Figura 21. Evolución de la MO durante el proceso de compostaje

De acuerdo a la Normativa de Compost- NCh 2880 (INN, 2004) el contenido de materia orgánica en los materiales compostados debe ser igual o superior a 200 g /kg.

La Figura 22, muestra que al día 119 de tratamiento, los cuatro tratamientos presentaron valores superiores a 530 g/kg de materia orgánica, por ende son aceptados por la Normativa de Compost.

#### 4.2.4 Carbono orgánico

El carbono es usado como fuente de energía por los microorganismos, y se libera en forma de dióxido de carbono, por lo que su valor disminuye en el tiempo.

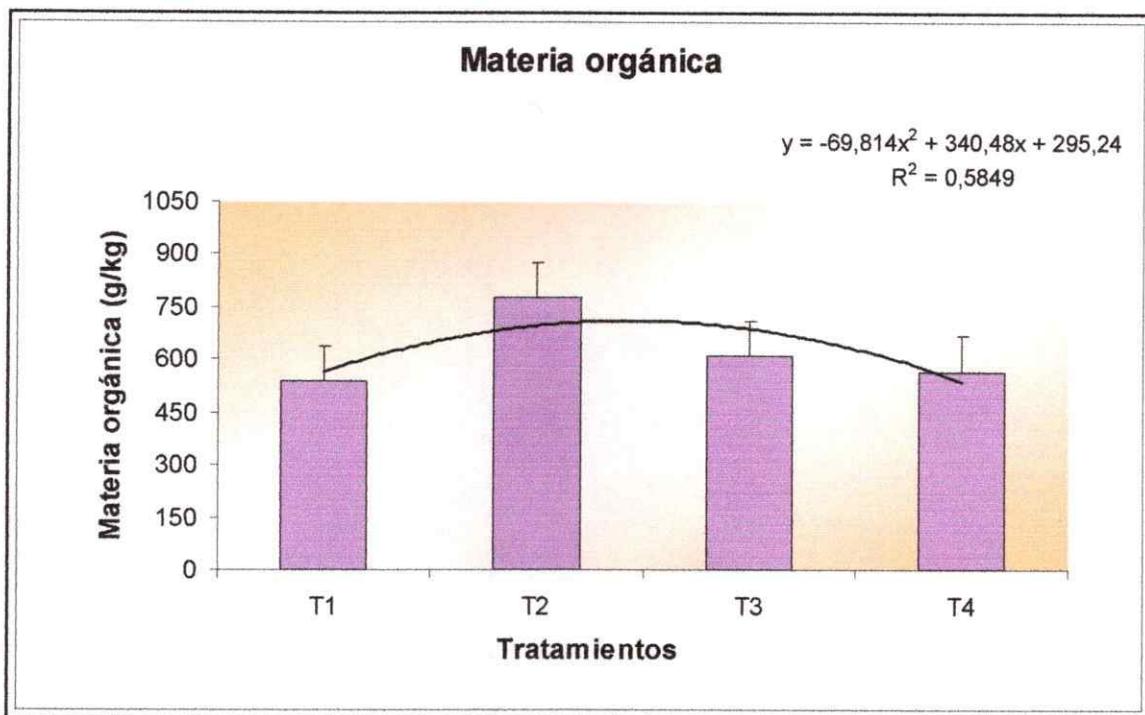


Figura 22. Contenido de MO en los tratamientos al día 119 de compostaje

Las materias primas presentaron los siguientes valores de carbono orgánico total: alperujo 429,50 g/kg; chips de poda 517,30 g/kg; escobajo 492,30 g/kg.

La disminución de este macroelemento es proporcional a la disminución de materia orgánica. Es por ello, que en los tratamientos T1, T3 y T4 se muestra una disminución de este parámetro. Sin embargo, el tratamiento que presentó la mayor disminución de carbono orgánico es el tratamiento T3 (Tabla 7, Apéndice III).

En cuanto al tratamiento T2, éste no presentó una disminución de carbono orgánico, al igual que los otros tratamientos, como se observó al analizar el contenido de materia orgánica. Esto se debe a los problemas de compactación que se

presentaron en este tratamiento con aireación forzada, impidieron una correcta biodegradación del material en proceso de compostaje.

#### **4.2.5 Nitrógeno**

Los contenidos de nitrógeno total en las materias primas fueron los siguientes: alperujo 7,3 g/kg; chips de poda 6,6 g/kg; escobajo 9,1 g/kg. Las tres materias primas utilizadas en la formación de pilas presentaron valores bajos de nitrógeno, por ende el aporte de este nutriente al comienzo del proceso de compostaje fue menor, incidiendo en la relación C/N.

En todos los tratamientos se observó que el contenido de nitrógeno total aumentó a medida que se desarrolló el proceso de compostaje (Tabla 8, Apéndice III). El incremento de este nutriente permite establecer que no hubo pérdida de nitrógeno a la atmósfera en forma de amoníaco, por lo que se aseguró el desarrollo y crecimiento de poblaciones microbianas. Esto se logró, controlando que durante el proceso, el pH no superará el valor 9.

El tratamiento que presentó un mayor aumento de nitrógeno fue el tratamiento T4, debido a que en este se utilizó escobajo, el cual aportó mayor contenido de este nutriente. Mientras que el tratamiento T2 presentó el menor aumento de nitrógeno producto de las condiciones de compactación y poca degradación del material. No obstante, todos los tratamientos en los días finales del periodo de estudio, cumplieron con la Normativa de Compost que señala que el contenido de nitrógeno total debe ser mayor a 5 g/kg.

El análisis estadístico mostró que no existen diferencias significativas entre los productos de los cuatro tratamientos, al finalizar el estudio.

#### **4.2.6 Relación carbono / nitrógeno**

La relación C/N de las materias primas utilizadas en el proceso fueron las siguientes: alperujo 59/1; chips de poda 78/1; escobajo 54/1. Como se observa todas las materias primas presentaron valores elevados de relación C/N (superando el valor óptimo de 30/1) lo que podría haber afectado el proceso de compostaje. Sin embargo, no se utilizó ningún aporte extra de nitrógeno, pues lo que se analizó fue el rol que cumplieron los agentes estructurantes.

El proceso de compostaje de alperujo permitió disminuir la relación C/N, excepto en el tratamiento T2 donde se observó un aumento en el día 119 de tratamiento. El tratamiento T3 obtuvo una relación C/N de 30/1 al día 98 de tratamiento, mientras que el tratamiento T4 alcanzó una relación de 21/ 1 al cuarto mes de tratamiento (Tabla 9, Apéndice III). De acuerdo a la Normativa de Compost (Nch 2880), la relación C/N adecuada para un compost es de 30/1 o menor, por lo que ambos tratamientos permiten que las materias en proceso de compostaje cumplan con la norma.

#### **4.2.7 Potasio**

Los contenidos de potasio total en las materias primas utilizadas fueron los siguientes: alperujo 7,5 g/kg; chips de poda 3,6 g/kg, escobajo 14,3 g/kg. Se observa que tanto el escobajo como el alperujo aportan este nutriente a las pilas formadas.

Los contenidos de potasio total en los diferentes tratamientos son muy similares, siendo el tratamiento T3 el que presentó menor cantidad de potasio pues se ve influenciado por la mezcla con chips de poda, que actúa como agente estructurante.

Se observa una disminución de este nutriente en todos los tratamientos, sin embargo, el tratamiento T4 es el que presentó una mayor disminución, si consideramos los contenidos de potasio total, de los días iniciales del proceso con respecto a los días finales (Tabla 10, Apéndice III).

#### **4.2.8 Fósforo**

Los contenidos de fósforo total en las materias primas utilizadas fueron los siguientes: alperujo 0,93 g/kg; chips de poda 0,71 g/kg, escobajo 2,4 g/kg.

Los análisis realizados, muestran que en los cuatro tratamientos se produce un aumento de este nutriente desde un contenido muy traza al inicio del proceso a cantidades muy altas en la etapa final del estudio (Tabla 11, Apéndice III), lo que es

favorable en el compost final pues este elemento es esencial en el desarrollo de las plantas.

### **4.3 Propiedades biológicas**

#### **4.3.1 Ensayo de fitotoxicidad (Bio-ensayo)**

Los análisis de fitotoxicidad realizados tanto en semillas de rabanito como en semillas de lechuga, demostraron que el alperujo puro es un material que presentó sustancias fitotóxicas. Los chips de madera, como materia prima, obtuvieron índices de germinación (tanto para rabanito como para lechuga) que indican que es un material que contiene sustancias fitotóxicas moderadas. En el caso del escobajo, los índices de germinación, tanto en rabanito como en lechuga, muestran que es un material que no presenta sustancias fitotóxicas (Tabla 12, Anexo IV).

Los índices de germinación, tanto en semillas de rabanito como en semilla de lechuga, indican que a partir del tercer mes de tratamiento (día 84), los materiales de los tratamientos T1, T3 y T4 no contenían sustancias fitotóxicas (figuras 23 y 24), por ende son materiales orgánicos que pueden ser aplicables a suelos, pues no presentan compuestos tóxicos para cultivos. Se debe mencionar que dentro de los tratamientos mencionados, el tratamiento T3 fue el que presentó generalmente los mayores índices de germinación durante el periodo de análisis de los materiales, así como al cuarto mes de tratamiento, cuando finaliza el periodo de estudio (Tabla 13, Apéndice IV).

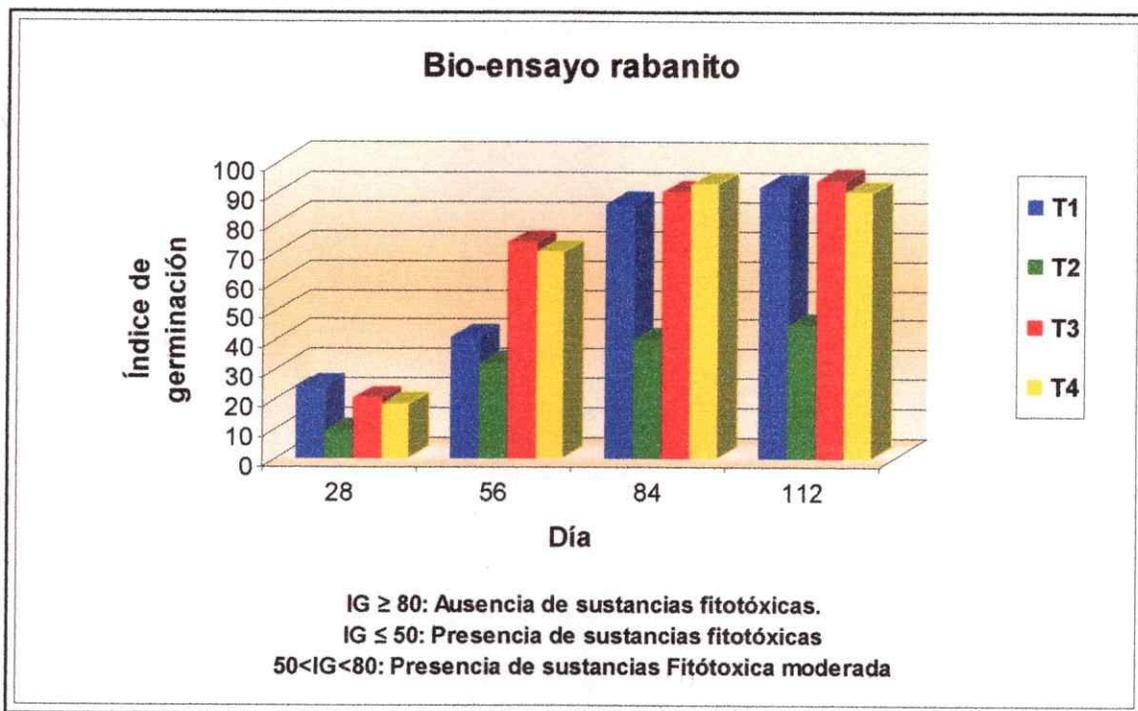


Figura 23. Bio-ensayo de fitotoxicidad realizado con rabanito, índices de germinación

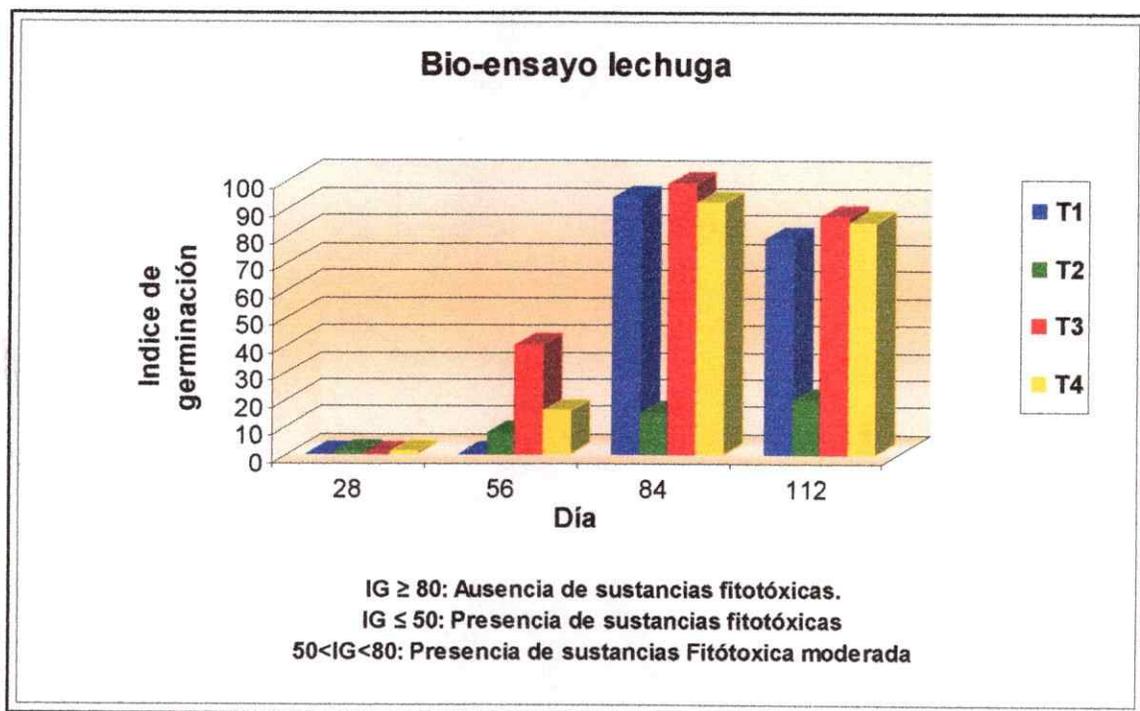


Figura 24. Bio-ensayo de fitotoxicidad realizado con lechuga, índices de germinación

## V. DISCUSIÓN

### 5.1 Propiedades físicas

#### 5.1.1 Temperatura

Si bien, los resultados antes mencionados indican que ambos agentes estructurantes optimizan el proceso de compostaje, pues comienzan antes la etapa termofílica, se observa que el tratamiento T3, presentó una mayor velocidad de biodegradación, ya que comienza tempranamente dicha fase e inicia la tendencia a la etapa de enfriamiento antes que los otros tratamientos, sin considerar el tratamiento T2 que presentó un periodo muy reducido en fase de crecimiento y solo un pico máximo de temperatura (Figura 11). La tendencia a la etapa de enfriamiento en el tratamiento T3, antes que en los otros tratamientos, implica una reducción de la actividad biológica por una menor disponibilidad de fracciones orgánicas biodegradables, debido a la mayor velocidad de biodegradación.

Sin embargo, los tratamientos T1, T3 y T4 evidenciaron una tendencia a la fase de maduración, lo que significaría que el sistema de volteo es más efectivo que el sistema de aireación forzada, debido a las características propias del alperujo.

#### 5.1.2 Humedad

Ésta es una variable en el proceso de compostaje que varió constantemente, por causa de las temperaturas ambientales que se produjeron durante los meses de

experimentación. Se debe mencionar que la humedad en el alperujo es difícil de mantener, pues el material forma agregados de partículas que impiden que el riego sea efectivo en los centros de las pilas de compostaje. No obstante ello, los tratamientos que cumplieron con la Normativa de Compost al finalizar el estudio, fueron aquellos que presentaron agentes estructurantes, por lo que estos materiales influyen en mantener y distribuir el riego en las pilas de compostaje ya que disgregan las partículas de alperujo que tienden a asociarse.

### **5.1.3 Densidad**

Es válido destacar, que en este estudio se realizó sólo densidad y no densidad aparente como indica la Norma Chile de Compost (NCh 28080), ya que este parámetro sólo se aplica a productos compostados maduros.

En esta investigación se realizó una aproximación de este parámetro, pues la densidad de los materiales de las primeras etapas del proceso de compostaje y de las materias primas no es relevante, ya que éstos no han sido tratados completamente (proceso de tamizaje y maduración), lo que pudiera alterar los valores de densidad.

De esta manera, la medición de densidad en las fases de latencia y crecimiento del proceso de compostaje, se realizó para obtener un antecedente sobre la estructura física de los materiales en proceso de compostaje. Así, los resultados obtenidos de este parámetro para los distintos tratamientos no pueden ser comparados entre sí, pues las muestras de cada tratamiento se vieron influenciadas por las respectivas materias primas.

No obstante, se observó que las densidades aumentaron en los cuatro tratamientos, aunque no de igual forma. Esto se podría explicar, en cierta medida, por la disminución en volumen que experimentaron las pilas en degradación aeróbica (Figura 16).

## **5.2 Propiedades químicas**

### **5.2.1 pH**

Si existe una deficiencia en la aireación de las pilas o una mala distribución del suministro de oxígeno, se producen ácidos orgánicos que generan una disminución en los valores de pH, limitando la eficiencia del proceso de compostaje. En el estudio realizado se observó un aumento en los valores del pH en todos los tratamientos. Sin embargo, el tratamiento T4, con escobajo como agente estructurante, presentó un incremento levemente mayor de este parámetro, con respecto a los tratamientos T1 y T3 (Figura 17), lo que permite asegurar que el agente estructurante genera las condiciones adecuadas de aireación, en las pilas en que se realizó la biodegradación aeróbica.

Los productos obtenidos de los tratamientos T1, T3 y T4 al finalizar el estudio no presentan mayores diferencias entre sí, respecto a este parámetro (Tabla 4, Apéndice II).

El compostaje del alperujo con sistema de volteo y agentes estructurantes permite obtener un producto con un rango de pH adecuado, que puede ser utilizado como enmienda orgánica para suelos degradados sin afectar el desarrollo vegetal.

### **5.2.2 Conductividad eléctrica**

Las conductividades eléctricas disminuyeron en los cuatro tratamientos (Figura 19) (Tabla 5, Apéndice II), por lo que el proceso de compostaje favoreció la disminución de sales en los residuos orgánicos, lo que incide directamente en la disminución de toxicidad de dichos materiales, factor importante en el tratamiento de residuos que pueden utilizarse como abonos orgánicos.

### **5.2.3 Materia orgánica, nitrógeno total y relación carbono / nitrógeno**

El compostaje de alperujo con agentes estructurantes, disminuyó el contenido elevado de carbono orgánico que presentaba dicho residuo (Tabla 7, Apéndice III). Esta disminución complementada con el aumento de nitrógeno total (Tabla 8, Apéndice III), permitió que la relación C/N disminuyera en las pilas en proceso de compostaje, permitiendo realizar el compostaje de alperujo en condiciones adecuadas para el desarrollo de las poblaciones microbianas. De esta manera, se obtuvo un producto estable y óptimo en cuanto a la relación C/N.

Los resultados indican que los agentes estructurantes influyen en el proceso de compostaje pues permiten una mayor aireación, lo que genera condiciones favorables para los microorganismos que desarrollan la actividad de descomposición oxidativa.

#### **5.2.4 Potasio y fósforo**

Estos compuestos se encontraron en formas inorgánicas, lo que es favorable en un compost maduro, pues de esta manera se hallan disponibles para la absorción que realizan las plantas.

### **5.3 Propiedades biológicas**

#### **5.3.1 Ensayo de fitotoxicidad (Bio-ensayo)**

Los tratamientos T1, T3 y T4, a partir del tercer mes de tratamiento, presentaron índices de germinación que demostraron que los materiales tratados se encontraban libres de fitotoxicidad. Dentro de los tratamientos señalados, el tratamiento T3 es el que presentó los mayores índices de germinación evaluados (figuras 23 y 24) (Tabla 13, Apéndice IV).

Estos resultados indican que la mayoría de las fracciones orgánicas se encontraban en fases finales de biodegradación y por ende ya metabolizadas por las comunidades microbianas.

Los niveles de fitotoxicidad de los residuos orgánicos pueden disminuir o eliminarse cuando alcanzan un grado de madurez química aceptable, que se atribuye al proceso biooxidativo que tiene lugar durante las distintas etapas del compostaje (Varnero, 2006).

## VI. CONCLUSIONES

Los dos tipos de agentes estructurantes analizados permitieron optimizar el proceso de compostaje en una primera etapa, ya que la fase termofílica se alcanzó en menor tiempo, en comparación con los tratamientos que sólo presentaron alperujo.

El sistema de volteo con adición de agente estructurante, ya sea chips de poda o escobajo, es un adecuado tratamiento que permite obtener a partir del alperujo puro, un producto estable, libre de sustancias fitotóxicas y que puede utilizarse como enmienda orgánica.

Los parámetros analizados, tanto en el material en proceso de compostaje como en el material obtenido al finalizar el estudio, no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con diferentes agentes estructurantes. Por ende, la adición tanto de chips de poda como de escobajo, al compostaje de alperujo permite obtener un producto estable, procedente de una correcta biodegradación oxidativa.

Al evaluar y comparar los agentes estructurantes en el proceso de compostaje de alperujo, se obtuvo que el chips de poda fue el que influenció en mayor medida la velocidad de biodegradación de dicho proceso. Esto implica que este agente estructurante, tiene una mayor incidencia en la obtención de compost de alperujo maduro y estable en menor tiempo, favoreciendo la disposición y almacenamiento de dicho residuo.

## VII. BIBLIOGRAFIA

- ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D., CEGARRA, J. 2004.** Agrochemical characterisation of "alperujo", a solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Bioresource Technology*. 91: 195-200.
- ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D., CEGARRA, J. 2006a.** Composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions. *Waste Management*. 26: 620-626.
- ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D., CEGARRA, J. 2006b.** Effects of bulking agent on the composting of "alperujo", the solid by-product of the two-phase centrifugation method for olive oil extraction. *Process Biochemistry*. 41: 127-132.
- ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D., CEGARRA, J. 2006c.** Effects of a compost made from the solid by-product ("alperujo") of the two-phase centrifugation system for olive oil extraction and cotton gin waste on growth and nutrient content of ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bioresource Technology*.
- ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., GARCÍA, D., CEGARRA, J. 2006d.** Measuring detoxification and maturity in compost made from "alperujo", the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemosphere*. 64: 470-477.
- ALEXANDER, M. 1961.** Introduction to soil microbiology. Wiley. New York.
- BASAGLIA, M., CONCHERI, G., CARDINALI, S., PASTI-GRISBY, M. B. y NUTI. 1992.** Enhanced degradation of ammonium – pretreated wheat straw by lignocellulosic *Streptomyces* spp. *Canadian journal of microbiology*. Rev. 38 (10):1022-1025.
- CANALS, M. E IRIARTE, J. 2004.** Curso de estadística universitaria. pp 99-114.
- CANTANHEDE, A., MONGE, G y WHARWOOD, G. 1993.** Compostaje de residuos de mercado. Lima. pp: 25-26.
- CEGARRA, J., ALBURQUERQUE, J. A., GONZÁLVEZ, J., TORTOSA, G., CHAW, D. 2006.** Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning. *Waste Management*. 7 p.
- CRAWFORD, D. L. 1986.** The role of actinomycetes in the decomposition of lignocellulose. *FEMS Symp*. Rev. 34: 715-728.
- FAO. FOOD AGRICULTURAL ORGANIZATION. 1984.** Reciclaje de materias orgánicas y biogás: Una experiencia en China.

- GOLUEKE, C.G.** 1972. Composting: A study of the process and its principles. Rodale Press, Emmaus. Penn Ed.
- GOLUEKE, C.G.** 1982. Composting: A review of rationale principles and public health. In Composting: Theory and practice for city, Industry and farm. JG Press, Emmaus. pp: 19-25.
- GONZÁLEZ, M.D., MORENO, E., QUEVEDO-SARMIENTO, J., RAMOS-CORMENZANA, A.** 1990. Studies on actibacterial activity of waste waters from olive oil mills (Alpechín): inhibitory activity of phenolic and fatty acids. Chemosphere 20: 423-432.
- GOTAAS, H. B.** 1956. Composting; sanitary disposal and reclamation of organic wastes. Geneva. World Health Organization.
- GRAY, K. R. y SHERMAN K.** 1970. Public cleansing. Rev. 60 (7): 343-354.
- HAUG, R.T.** 1979. Engineering principles of sludge composting. J. Water Pollut. Control fed. Rev. 51: 2189-2206.
- HAUG, R.T.** 1980a. Compost engineering: Principles and Practice. Ann Arbor Science, Michigan.
- HAUG, R.T.** 1980b. Organic waste recycling. 2nd edition. 85 p.
- HAUG, R. T.** 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis publishers. pp: 411-717.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN).** 2004. Norma Chilena de Compost 2880-2004, Compost – Clasificación y requisitos. Santiago, Chile. 21 p.
- KIRK, T. K. y FARRELL.** 1987. Enzimatic "combustion": The microbial degradation of lignin. Annu. Microbiology. Rev. 41: 465-505.
- LABRADOR, J.** 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Mundi-Prensa, Madrid, España. pp: 115-124.
- LADISCH, M. R., LIN, K. W., VOLOCH, M., y TSAO, G. T.** 1983. Process considerations in the enzymatic hydrolysis of biomass. Enzyme microbiology technology. Rev. 5 (2): 82-102.
- LYNCH, J. M.** 1992. Substrate availability in the production of compost. Proceedings of the international composting research symposium. pp 24-35.
- MARTÍNEZ, G., CARBONELL, R., GIRÁLDEZ, JV., ORDÓÑEZ, R., LLANOS, I., y CABALLERO, JA.** 2005. Compostado y aplicación de alperujo en olivar [en línea] <<http://www.expoliva.com/expoliva2005/simposium/comunicaciones/OLI-66.pdf>> [consulta: 03 marzo 2007].

**McKINLEY, V. L., VESTAL, J. R. y ERALP, A. E.** 1985. Microbial activity in composting. *Biocycle Rev.* 26: 47-50.

**METCALF y EDDY, Inc.** 1991. *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse.* 3rd edition. McGraw-Hill, New York.

**MILLER, F.C.** 1991. Biodegradation of solid wastes by composting. A.M. Martin (eds), *Biological degradation of wastes.* Elsevier Science Publishers, Essex IG118JU, England. Pp: 1-25.

**POLPRASERT, C., WANGSUPHACHART, S. y MUTTAMARA S.** 1980. Composting nightsoil and water hyacinth in the tropics. *Compost science/land utilization. Rev.* 21: 25-27.

**RICHARD, T.L.** 1992. Municipal solid waste composting. Physical and biological processing biomass and bioenergy. *Rev.* 3 (3-4): 163-180.

**SANTIBÁÑEZ, CLAUDIA.** 2002. Diseño y evaluación de una planta piloto de compostaje para tratamiento de residuos de origen vegetal. Tesis (Químico Ambiental). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias. 93 p.

**SATRIANA, M.J.** 1974. *Large scale composting.* Park Ridge. Noyes; Data Corporation.

**STROM, P.F.** 1985. Identification of thermophilic bacteria in solid-waste composting. *Application Environmental Microbiology. Rev.* 50: 906-913.

**THE COMPOSTING COUNCIL RESEARCH AND EDUCATION FOUNDATION.** 2004. *Test Methods for the Examination of Composting and Compost.* U.S. Composting Council Research and education Foundation. [en línea] <<http://www.tmecc.org>> [consulta: 01 marzo 2007].

**VAN SOEST, P. J.** 1994. *The nutritional ecology of the ruminant.* Cornell university press. Ithaca, N.Y. 476 p.

**VOGTMANN, H., FRICKE y TURK, T.** 1993. Quality, physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals in biogenic waste composts. *Compost Science and utilization. Rev.* 4: 69-87.

**VARNERO, M.** 2005. V Taller de Producción de compost. Aspectos técnicos legales y desafíos. Santiago. Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 25 p.

**VARNERO, M., ORELLANA, R., ROJAS, C., MACAYA, C.** 2006. Compostaje de residuos de la industria extractiva del aceite de oliva. Encuentro iberoamericano de olivicultura. VII Jornadas olivícolas nacionales. La Serena. Chile. pp: 48-50.

**ZUCCONI, F., PERA, A., FORTE, M., DE BERTOLDI, M.** 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle.* 22: 54-57.

## APÉNDICES

**Apéndice I**  
**Mediciones de temperatura en las pilas de compost**

Tabla 3. Temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje

Día	T1 (°C)	Día	T2 (°C)	Día	T3 (°C)	Día	T4 (°C)
1	24,8	1	27,3	1	36,5	1	33,1
2	26,8	2	32,5	2	49,8	2	35,4
3	30,9	3	38,9	3	45,7	3	37,4
4	29,3	4	38,9	4	45,4	4	40,2
5	29,7	5	39,4	5	49,7	5	41,7
6	30,1	6	40,7	6	53,4	6	41,5
7	32,0	7	40,4	7	53,2	7	42,8
8	32,1	8	40,1	8	53,8	8	44,4
9	34,7	9	42,0	9	53,7	9	44,9
10	35,5	10	39,8	10	57,4	10	41,3
11	40,1	11	43,5	11	50,5	11	45,3
12	39,9	12	42,5	12	53,6	12	45,7
13	36,9	13	43,4	13	56,2	13	45,5
14	41,2	14	43,3	14	52,3	14	46,0
15	38,5	15	43,3	15	52,8	15	48,5
16	40,2	16	40,6	16	52,1	16	48,9
17	39,3	17	42,0	17	53,9	17	49,6
18	41,1	18	42,2	18	51,8	18	49,6
19	42,6	19	43,6	19	51,3	19	43,2
20	47,6	20	44,1	20	48,7	20	46,5
21	47,8	21	42,8	21	53,4	21	50,1
22	48,2	22	42,4	22	53,0	22	52,8
23	48,9	23	40,9	23	54,5	23	53,5
24	51,0	24	44,7	24	55,3	24	54,7

(Continuación) Tabla 3. Temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje

Día	T1 (°C)	Día	T2 (°C)	Día	T3 (°C)	Día	T3 (°C)
25	52,4	25	45,2	25	53,7	25	50,6
26	52,6	26	45,2	26	53,2	26	53,7
27	51,4	27	48,1	27	51,8	27	54,3
28	54,8	28	47,9	28	53,0	28	53,2
29	54,2	29	46,8	29	50,4	29	51,1
30	54,0	30	48,7	30	52,5	30	50,6
31	55,3	31	46,9	31	48,9	31	48,4
32	55,8	32	49,4	32	49,3	32	49,6
33	55,6	33	45,7	33	57,7	33	53,8
34	50,8	34	48,6	34	57,4	34	53,9
35	55,3	35	48,3	35	57,7	35	57,6
36	54,6	36	47,5	36	57,6	36	57,4
37	54,7	37	45,4	37	58,6	37	55,6
38	56,1	38	48,4	38	58,9	38	53,6
39	56,7	39	47,6	39	56,9	39	53,7
40	54,5	40	46,4	40	55,4	42	52,3
41	53,7	41	46,0	41	55,3	43	50,0
42	53,7	42	44,7	44	52,8	44	47,5
45	51,0	45	48,6	45	51,3	45	46,7
46	51,3	46	47,5	46	49,8	46	53,5
47	50,1	47	44,2	47	49,9	50	53,3
48	48,3	48	45,0	48	47,8	51	55,0
49	49,5	49	44,5	52	47,3	52	53,8

(Continuación) Tabla 3. Temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje

53	53,6	53	45,0	53	50,4	53	57,4
54	55,3	54	42,2	54	54,5	57	53,2
55	53,5	55	42,7	55	59,2	58	51,2
56	58,8	56	43,0	59	54,4	59	51,3
60	55,2	60	38,6	60	53,6	60	50,0
61	53,9	61	39,2	61	55,7	64	55,8
62	55,4	62	41,2	62	52,0	65	56,3
63	51,0	63	43,0	66	51,1	66	56,4
67	52,6	67	39,4	67	48,6	67	55,3
68	49,0	68	40,8	68	47,6	70	55,1
69	52,4	69	39,2	69	45,7	71	54,8
70	55,1	70	40,2	72	54,1	72	53,9
73	58,4	73	36,5	73	53,4	73	51,5
74	56,8	74	37,1	74	53,0	74	50,7
75	56,4	75	37,8	75	52,7	77	47,5
76	56,4	76	35,1	76	51,0	79	43,8
77	53,4	77	36,3	79	49,5	81	47,5
80	52,8	80	33,8	81	46,8	84	60,2
82	47,3	82	35,5	83	53,0	86	54,9
84	45,6	84	33,1	86	52,7	88	50,1
87	50,0	87	35,8	88	46,5	91	43,3
89	48,4	89	32,7	90	44,8	93	41,8
91	49,4	91	31,6	93	41,1	95	42,8
94	49,1	94	29,6	95	38,6	98	42,6

(Continuación) Tabla 3. Temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje

Día	T1 (°C)	Día	T2 (°C)	Día	T3 (°C)	Día	T3 (°C)
96	46,5	96	31,7	97	38,7	100	41,5
98	44,4	98	32,7	100	38,6	102	50,4
101	46,3	101	32,9	102	47,0	106	44,2
103	44,0	103	30,0	104	47,5	107	44,8
105	54,1	105	29,9	108	43,7	112	37,1
109	47,1	109	29,4	109	45,2	114	37,4
110	45,9	110	28,4	114	38,6	116	44,2
115	36,5	115	28,9	116	39,3	119	47,5
117	40,1	117	28,3	118	48,0	121	45,3
119	51,7	119	29,3	121	47,1	123	41,5
122	49,3	122	31,4	123	44,6	126	38,1
124	44,3	124	30,6	125	40,9	127	37,5
129	37,0	129	30,4	129	35,9	129	36,2

**Apéndice II**  
**Análisis químicos**

Tabla 4. Evolución del pH en los tratamientos en proceso de compostaje

Día	T1	T2 (*)	T3	T4
1	5,45	5,44	5,09	5,27
7	4,90	5,07	4,86	5,04
14	5,27	5,13	5,03	5,18
21	5,57	5,70	5,83	5,82
28	5,26	5,58	5,22	5,16
35	5,14	5,33	5,56	5,42
42	5,93	5,75	6,13	5,80
49	5,08	4,97	5,60	5,44
56	5,46	5,07	6,13	5,94
70	5,78	4,93	6,10	6,09
77	6,52	5,65	6,41	6,33
84	5,98	5,18	6,31	6,50
91	6,63	5,22	6,29	6,51
98	6,59	5,53	6,37	6,54
105	6,77	5,74	6,49	6,68
112	6,54	5,21	6,06	6,47
119	6,95	5,61	6,51	6,78

ANDEVA para pH del producto final (día 119)

FV	S.C.	G.I.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	3,74	3	1,25	4,18	2,75
Error	19,07	64	0,30		
Total	22,81	67			

Tratamiento con (\*) muestra la existencia de diferencias significativas con los tratamientos restantes (Prueba de Tukey).

Tabla 5. Conductividad eléctrica en los tratamientos en proceso de compostaje (dS/m)

Día	T1	T2	T3	T4
1	1,16	1,23	1,17	1,32
7	1,13	1,08	1,10	1,30
14	1,22	1,17	1,06	1,16
21	1,05	1,04	0,93	1,35
28	1,12	0,51	0,89	1,10
35	0,95	1,22	0,83	1,08
42	1,15	0,85	0,68	0,97
49	0,93	0,93	0,73	0,98
56	0,95	0,69	0,62	0,83
70	0,79	0,88	0,70	0,79
77	0,65	0,82	0,61	0,75
84	0,74	0,78	0,59	0,69
91	0,57	0,82	0,63	0,67
98	0,64	0,68	0,62	0,76
105	0,76	0,94	0,72	0,84
112	0,73	0,71	0,70	0,80
119	0,68	0,56	0,67	0,81

ANDEVA para la conductividad eléctrica del producto final (día 119)

FV	S.C.	G.I.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	0,27	3	0,09	1,98	2,75
Error	2,86	64	0,04		
Total	3,13	67			

**Apéndice III**  
**Contenido de macroelementos**

Tabla 6. Contenido de materia orgánica en los tratamientos en proceso de compostaje (g/kg)

Día	T1	T2 (*)	T3	T4
1	685,0	728,4	762,4	768,2
7	751,0	733,6	746,1	832,3
14	728,7	742,8	743,7	722,3
21	705,4	641,0	705,8	716,3
35	694,7	765,1	723,3	674,5
42	670,1	717,0	700,9	748,3
49	704,8	773,8	639,3	683,0
56	616,7	671,4	610,0	585,6
70	599,7	748,1	609,9	671,5
77	661,5	731,8	682,3	686,1
84	608,4	699,5	642,0	714,1
91	649,0	724,7	631,9	626,9
98	667,9	700,8	670,2	663,8
105	610,2	673,6	596,8	667,0
112	598,10	719,46	559,94	597,85
119	539,35	776,59	608,70	566,68

ANDEVA para el contenido de materia orgánica del producto final (día 119)

FV	S.C.	G.I.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	41178,33	3	13726,11	4,18	2,76
Error	197114,92	60	3285,24		
Total	238292,75	63			

Tratamiento con (\*) muestra la existencia de diferencias significativas con los tratamientos restantes (Prueba de Tukey).

Tabla 7. Carbono orgánico total en los tratamientos durante el proceso de compostaje (g/kg)

Día	T1	T2	T3	T4
1	380,5	404,6	423,6	426,8
7	417,2	407,5	414,5	462,4
14	404,8	412,7	413,2	401,3
21	391,9	356,1	392,1	398,0
35	386,0	425,0	401,8	374,7
42	372,3	398,3	389,4	415,7
49	391,5	429,9	355,2	379,4
56	342,6	373,0	338,9	325,4
70	333,2	415,6	338,9	373,1
77	367,5	406,6	379,0	381,2
84	338,0	388,6	356,7	396,7
91	360,5	402,6	351,0	348,3
98	371,1	389,3	372,3	368,8
105	339,0	374,2	331,5	370,6
112	332,28	399,70	311,08	332,14
119	299,64	431,44	338,17	314,82

Tabla 8. Nitrógeno total en los tratamientos durante el proceso de compostaje (g/kg)

Día	T1	Día	T2	Día	T3	Día	T4
7	6,9	7	6,7	7	7,9	7	7,1
56	10,00	56	8,00	35	11,90	84	11,70
98	12,00	119	8,30	98	12,50	112	16,00

ANDEVA para el contenido de nitrógeno total del producto final (día 119)

FV	S.C.	G.I.	C.M.	F calculado	F crítico
Tratamiento	26,10	3	8,70	1,04	4,07
Error	66,78	8	8,35		
Total	92,88	11			

Tabla 9. Relación carbono / nitrógeno en los tratamientos durante el proceso de compostaje

Día	T1	Día	T2	Día	T3	Día	T4
7	60	7	61	7	52	7	65
56	34	56	47	35	34	84	34
98	31	119	52	98	30	112	21

Tabla 10. Potasio total en los tratamientos durante el proceso de compostaje (g/kg)

Día	T1	Día	T2	Día	T3	Día	T4
7	7,6	7	7,4	7	6,7	7	7,9
56	4,6	56	3,2	35	4,6	84	4,1
98	3,5	119	3,7	98	3,0	112	4,3

Tabla 11. Fósforo total en los tratamientos durante el proceso de compostaje (g/kg)

Día	T1	Día	T2	Día	T3	Día	T4
7	0,96	7	0,85	7	0,79	7	0,83
56	3,7	56	3,0	35	3,7	84	3,7
98	3,4	119	3,7	98	3,7	112	4,1

**Apéndice IV**  
**Bio- ensayo de fitotoxicidad**

Tabla 12. Índices de germinación de las materias primas

Material	Índice de Germinación	
	Rabanito	Lechuga
Alperujo	37	0
Chips de poda	69	51
Escobajo	90	85

Tabla 13. Índices de germinación de los materiales en proceso de compostaje

Tratamiento	Día de tratamiento	Índice de Germinación	
		Rabanito	Lechuga
T1	28	24	0
T2	28	9	1
T3	28	20	0
T4	28	18	1
T1	56	41	0
T2	56	32	8
T3	56	73	40
T4	56	70	16
T1	84	86	94
T2	84	40	15
T3	84	90	99
T4	84	93	92
T1	112	92	79
T2	112	45	20
T3	112	94	87
T4	112	90	85