

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**COMPOSTAJE DEL COPRODUCTO (DIGESTATO) QUE SE GENERA EN LA
DIGESTIÓN METANOGÉNICA DEL ALPERUJO (RESIDUO DE OLIVO)**

JAVIERA ISABEL SUÁREZ FUENTES

Santiago, Chile
2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**COMPOSTAJE DEL COPRODUCTO (DIGESTATO) QUE SE GENERA EN LA
DIGESTIÓN METANOGÉNICA DEL ALPERUJO (RESIDUO DE OLIVO)**

**COMPOSTING OF A CO-PRODUCT THAT IS GENERATED IN THE
METHANOGENIC DIGESTION OF ALPERUJO**

JAVIERA ISABEL SUÁREZ FUENTES

Santiago, Chile
2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**COMPOSTAJE DEL COPRODUCTO (DIGESTATO) QUE SE GENERA EN LA
DIGESTIÓN METANOGÉNICA DEL ALPERUJO (RESIDUO DE OLIVO)**

Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo
Mención Manejo de Suelos y Aguas

JAVIERA ISABEL SUÁREZ FUENTES

Profesora Guía	Calificaciones
Sra. María Teresa Varnero M. Químico Farmacéutico	7,0
Profesores Evaluadores	
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,5
Sr. Werther Kern F. Ingeniero Agrónomo, MBA	6,0

Santiago, Chile
2012

A Javier Suárez Maldonado
Mi papito preferido

AGRADECIMIENTOS

A mi núcleo más cercano, el de mi casa. A mi mamá quien me entregó todo su apoyo, cariño y por sobre todo paciencia durante todo este largo andar. A mi papá, quien me enseñó que en la vida no estamos solos, sino que somos parte de una sociedad y es nuestro deber velar por un mundo mejor. A mi hermano, mi amigo, quien siempre me integró en su vida y me entregó su compañía. También quisiera agradecer a mi nana, una persona excepcional, de aquellas que se presentan solo una vez en la vida. Y a mi familia, mi prima Vilma, mi prima Cinthya, mi primo Sebastián.

A los amigos de la casa, Sebastián Ogalde, Luis Briceño, Pablo Acuña (mi sobrino), Antonio Azócar, muy importantes en mi vida. Aquellos amigos, que desde niña me vieron crecer y me integraron en sus andanzas, sus carretes, sus vidas. A Esteban Oyarzún, pilar fundamental de mi vida, su amor incondicional siempre ha guiado mi camino.

A mis amigas queridas. A Paulina Bustos, crecimos juntas, reímos juntas, lloramos juntas. A Romina Vera, quien con su instinto maternal me alegró muchas tardes invernales de enero. A mi amiga Eugenia Agurto, quien me enseñó a disfrutar la vida con sus ausencias y presencias. A mis amigas del colegio. A mis *esposas* queridas Leticia Silva y Moira Cádiz. A Daniela Miranda, Karen Lambrecht, Lorena Solar, Susana Sevilla.

A la oficinita. Ellos me ayudaron en la larga tarea de montar mi ensayo. A Karina Galleguillos, esta memoria no hubiese sido posible sin su apoyo, consejos, enseñanzas y extremada dedicación. A Fabián Abarza, quien me ayudó cada vez que no entendía y me negaba a aprender de estadística. A Orlando Macari quien siempre colaboró en todo lo que le pidiese. A la Montse, una niña que me alegró muchas tardes de trabajo. A Maximiliano Taylor, quien me ayudó, me cobijó y me aconsejó en los momentos más difíciles de este periplo, sin su constante apoyo y amor esta tarea hubiese sido aún más complicada. A Ninoska Gajardo, Don Hugo y a toda la gente de AGRIMED.

A mi profesora guía, Sra. María Teresa Varnero, quien me dio la posibilidad de trabajar con ella, gracias por su entrega, consejos, dedicación y su calidad humana.

A Hans Yoldi de Comercial y Agroindustria Soho S.A. y a Lo Valledor que me proporcionaron los residuos necesarios.

A los funcionarios, parte fundamental e importante de esta universidad, al Tío René, gracias por alimentarme tantas veces, la Señora Luisa, El Mota, Chamorro, Tío Coné, Don Gabriel y tantos otros.

Al Ministerio de Energía (Biogás y Aplicaciones) y al proyecto FONDEF D07I1008 por brindarme los recursos necesarios para la ejecución de esta investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Hipótesis.....	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Lugar de Estudio	6
Clima.....	6
Materias primas y recursos.....	6
Metodología	7
Tratamiento y diseño del experimento.....	7
Parámetros controlados durante el proceso de compostaje.....	8
Propiedades Físicas	9
Temperatura	9
Contenido de agua.....	9
Propiedades Químicas.....	9
pH.....	9
Conductividad Eléctrica.....	9
Materia Orgánica.....	9
Nitrógeno total	9
Propiedades Biológicas	10
Actividad Biológica	10
Ensayo de Fitotoxicidad.....	10
Análisis Estadísticos	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
Propiedades Físicas	12
Contenido de agua.....	14
Propiedades Químicas.....	15
pH.....	15
Conductividad Eléctrica.....	17
Materia Orgánica.....	19
Carbono Orgánico	20
Nitrógeno total	21
Relación Carbono Nitrógeno.....	21
Evolución de CO ₂ (Respiración)	22
Ensayo de Fitotoxicidad.....	23
Análisis con semilla de rabanito	23
Análisis con semilla de lechuga.....	25
CONCLUSIONES	28
BIBLIOGRAFÍA	29

APÉNDICES.....	33
Apéndice I.....	33
Apéndice II.....	35
Apéndice III.....	35
Apéndice IV.....	36
Apéndice V.....	36
Apéndice VI.....	37
Apéndice VII.....	37

RESUMEN

COMPOSTAJE DEL COPRODUCTO (DIGESTATO) QUE SE GENERA EN LA DIGESTIÓN METANOGÉNICA DEL ALPERUJO (RESIDUO DE OLIVO)

En el proceso de elaboración de aceite de oliva han surgido nuevas tecnologías en el cual, además de aceite, se produce un residuo denominado alperujo. Esta modificación, representa un problema a la hora de disponer los grandes volúmenes de residuo que se generan. En consecuencia, resulta necesario buscar alternativas para el tratamiento de estos subproductos. Actualmente, es posible destinar el alperujo a la cogeneración de energías renovables mediante combustión (biogás). Sin embargo, luego de la obtención de biogás, generado por procesos de fermentación metanogénica, es necesario disponer los nuevos residuos generados, denominado digestato, de manera que no causen daño al medio ambiente. Por ello, se propone como solución terminar de estabilizar el digestato mediante compostaje, obteniendo un producto final inocuo, el cual puede ser utilizado como acondicionador orgánico que mejora las propiedades físicas del suelo.

En el presente estudio se compararon dos tratamientos. El primer tratamiento (T0), fue elaborado con materias primas frescas, alperujo y rastrojos de betarraga. El segundo tratamiento (T1) fue elaborado con el digestato proveniente de un biodigestor tipo batch, cuyas materias primas fueron alperujo y rastrojos de betarraga. Ambos tratamientos fueron evaluados y monitoreados durante todo el proceso de compostaje. Se registró y analizó diversos parámetros, tales como; temperatura, contenido de agua, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, relación C/N, actividad biológica y fitotoxicidad.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la Normativa Chilena de Compost, NCh2880, es posible clasificar al compost obtenido del tratamiento T0 como Clase B, producto de calidad intermedia, y al compost obtenido del tratamiento T1 como Clase A, producto de alto nivel de calidad. Esta diferencia radica en la relación carbono/nitrógeno determinada al finalizar el proceso. Además, los tratamientos difirieron en cuanto a las etapas del proceso y a la duración de éstas. El tratamiento T0 cumplió las cuatro etapas y la duración fue de 158 días, alcanzando la etapa termofílica a los 77 días. En cambio, el tratamiento T1 no tuvo etapa mesofílica inicial y el proceso duró 96 días. De esta manera, se demuestra que la utilización de materias primas previamente degradadas por digestión anaeróbica reduce considerablemente el tiempo de estabilización y maduración en el proceso de compostaje, generando un producto con estándares más óptimos para utilizarlo con fines agronómicos.

Palabras claves: compost, estabilización de residuos, procesos aeróbicos, residuos de aceite de oliva.

ABSTRACT

COMPOSTING OF A CO-PRODUCT THAT IS GENERATED IN THE METHANOGENIC DIGESTION OF ALPERUJO

The aim of this study was to evaluate whether the use of organic residues generated by methanogenic fermentation (digestate), reduces the composting time required for a safe final product, compared to the same treatment applied to previously unfermented raw materials. To determine the efficiency and dynamics of the composting process from both treatments were characterized and evaluated the products according to standards established by Chilean Standard Composting.

According to Chilean Standards Compost is possible to classify the resulting compost treatment T0 as Class B and treatment T1 resulting compost as Class A. This difference is the carbon / nitrogen ratio evaluated at the end of the process. In addition, the treatments differed as to the process steps and their duration.

Thus, it is shown that the use of raw materials previously stabilized by anaerobic digestion reduces the time of stabilization and maturation in the composting process and generates a product with optimal standards for use.

The compost obtained in both treatments can serve as organic conditioner, since it is a mature product and stable, which can improve the physical characteristics of soil.

Finally, the composting process is a good strategy to take advantage of efficiently and effectively by-products produced by the olive oil industry.

Key words: compost, olive-mill by product, organic waste, stabilization of residues.

INTRODUCCIÓN

El olivo se cultiva en más de cuarenta países en todos los continentes, siendo relevante en su actividad agrícola, social y económica. Según publicaciones realizadas por ODEPA (2010), la superficie en Chile continúa aumentando y bordea 24.000 ha., con una alta productividad promedio, considerando que aún muchos huertos están en formación y otros se encuentran iniciando su producción.

En este contexto, han ocurrido transformaciones tecnológicas con respecto al proceso de elaboración de aceite de oliva a lo largo de los últimos veinticinco años, las cuales han modificado notoriamente la producción, composición y aprovechamiento de sus subproductos. El sistema de extracción continua mediante centrífugas de tres fases que genera aceite, orujo y alpechín se ha ido sustituyendo progresivamente desde los años noventa. En la actualidad, se ha implementado el sistema continuo de dos fases donde, además de aceite, se produce un residuo denominado alperujo (Aranda, 2006; Alburquerque *et al*, 2004). El objetivo de ese cambio tecnológico en el proceso de extracción es la reducción del consumo de agua y de energía, aunque esta modificación, sin embargo, genera un residuo cuyo manejo supone nuevas adaptaciones del sector respecto a su transporte y almacenamiento y, lo que es más importante, respecto a su uso y valorización (Aranda, 2006).

El problema de la eliminación de alperujo aún no ha sido resuelto por completo, lo que hace necesario investigaciones en nuevos procedimientos tecnológicos que permitan su uso rentable y amigable con el medio ambiente. Actualmente, el alperujo se destina para la cogeneración de energías renovables mediante combustión. Sin embargo, debido a la gran cantidad de residuo que se genera, además resulta necesaria la búsqueda de otras vías alternativas para el tratamiento de estos subproductos. El alperujo, dada su composición vegetal y su riqueza en materia orgánica es posible emplearlo, además, como enmienda orgánica. A pesar de esto, el alperujo posee componentes tóxicos de naturaleza muy variada que produce efectos nocivos sobre el suelo y los cultivos vegetales, por lo que se necesita su estabilización antes de su uso (Aranda, 2006). Una posibilidad es utilizar el compostaje como método para la preparación de fertilizantes orgánicos y enmiendas del suelo, ya que la aplicación directa de alperujo al suelo se ha visto que tienen un efecto perjudicial sobre la estabilidad estructural del suelo. También puede afectar negativamente a la germinación de semillas, crecimiento de plantas y la actividad microbiana (Alburquerque *et al*, 2004).

El proceso de compostaje se puede definir como la oxidación biológica de residuos orgánicos que se produce en condiciones controladas de humedad, temperatura y aireación. Los microorganismos que participan en el proceso, como bacterias y hongos, utilizan el carbono y nitrógeno disponibles en los residuos orgánicos, liberando energía por la actividad metabólica y produciendo finalmente compuestos más simple, estables y menos tóxicos como agua, dióxido de carbono y sales minerales. Es un proceso complejo,

dinámico y exotérmico. En el proceso de compostaje, la temperatura varía dependiendo de la actividad metabólica de los microorganismos. De acuerdo con este parámetro, el proceso de compostaje se puede dividir en cuatro etapas: mesófila, termófila, de enfriamiento y maduración (O’Ryan, 2007).

El compost debe presentar ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas que permitan asegurar su calidad y uso como acondicionador y mejorador de suelos. De acuerdo a la Norma Chilena de Compost 2880, se define como el producto que resulta del proceso de compostaje, el cual está constituido principalmente por materia orgánica estabilizada, donde no se reconoce su origen, puesto que se degrada generando partículas más finas y oscuras (INN, 2004).

En consecuencia, el compostaje puede ser considerado una alternativa conveniente para el tratamiento de alperujo, sin embargo este proceso presenta una lenta biodegradación de materia orgánica, un incremento en el pH y un decrecimiento en la relación C/N; debido a la composición compleja de este residuo, estos tratamientos requieren largos períodos de tiempo y no son demasiado efectivos (Aranda, 2006; Alburquerque *et al*, 2004).

Por otro lado, el alperujo puede ser utilizado como materia prima de digestores anaeróbicos, los cuales dan como resultado un residuo denominado digestato, el cual se encuentra parcialmente degradado y puede ser completamente estabilizado mediante compostaje. La estabilización de estos residuos orgánicos previo a su incorporación al suelo, tiene como finalidad acelerar la descomposición o mineralización primaria de subproductos y desechos orgánicos, para obtener un producto orgánico más estable biológicamente, enriquecido en compuestos húmicos y libre de patógenos (Varnero, 2001).

Hipótesis

Las materias primas previamente tratadas por digestión anaeróbica podrían reducir el tiempo de estabilización y maduración en el proceso de compostaje.

Objetivo General

- Evaluar si el uso de residuos generados por la fermentación metanogénica (digestato) reduce el tiempo de compostaje que se requiere para obtener un producto final inocuo, respecto del mismo tratamiento aplicado a materias primas sin fermentar previamente.

Objetivos Específicos

- Caracterizar y evaluar calidad de compost de origen metanogénico, de acuerdo a las normas establecidas por la Norma Chilena 2880 (INN, 2004) y los métodos propuestos por TMECC (2004).
- Comparar la dinámica y eficiencia del compostaje del digestato generado en el proceso metanogénico con la del mismo proceso de tratamiento aplicado a la materias primas no tratadas anaeróbicamente.
- Verificar si se cumplen todas las etapas necesarias en el proceso de compostaje en el tratamiento cuyo sustrato será el residuo sólido obtenido a partir de la biodigestión anaeróbica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de Estudio

El presente estudio se realizó entre los meses de Junio de 2011 y Marzo de 2012, en la Planta Piloto de Compostaje del Centro de Agricultura y Medioambiente (AGRIMED) y en el laboratorio de Reciclaje Orgánico, ambos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la comuna de La Pintana, Santiago de Chile. Su ubicación geográfica corresponde a 33 ° 34 ' Latitud Sur y 70 ° 38' Latitud Oeste, y 405 m.s.n.m.

Clima

Se encuentra en una zona de clima templado mesotermal estenotérmico mediterráneo semiárido, que se caracteriza por un régimen térmico con una temperatura máxima media en Enero de 28,2°C y una mínima media en Julio de 4,4°C. El régimen hídrico tiene una precipitación media anual de 419 mm, un déficit hídrico de 997 mm y un período seco de 8 meses (Santibáñez y Uribe, 1990).

Materias primas y recursos

Para el presente estudio se llevó a cabo un proceso de estabilización de residuos orgánicos, a través de compostaje, en el cual se elaboraron pilas, cuyas materias primas fueron residuos de la industria olivícola y hortícola, y residuos sólidos (digestato). El residuo de alperujo utilizado fue proporcionado por “Comercial y Agroindustria SOHO S.A.”, Comuna de Paine; el rastrojo de betarraga se obtuvo de la Central de Abastecimiento Lo Valledor, Comuna de Pedro Aguirre Cerda. El residuo sólido fue obtenido de biodigestores de carga discontinua tipo Batch, Estos biodigestores habían sido implementados en la planta piloto del Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED) con el objeto de generar biogás a partir de alperujo mezclado con rastrojos de hortalizas en una relación carbono/nitrógeno igual a 30/1 (Guerrero, 2010). Una vez finalizado este bioproceso metanogénico, que tuvo una duración de 6 meses aproximadamente , se obtuvo digestato

parcialmente degradado, razón por la cual se terminó de estabilizar mediante una digestión de tipo aeróbica, a través de compostaje para obtener un producto final inocuo.

Metodología

Tratamiento y diseño del experimento

El ensayo, realizado en campo, constó de dos tratamientos. Para el tratamiento 0 (alperujo y rastrojo de betarraga) se realizaron tres repeticiones. En cambio, el tratamiento 1 (digestato) tuvo solo una repetición (Cuadro 1). Las pilas se construyeron de tal manera de alcanzar una forma piramidal, cuyo volumen fue de 1 m³.

Cuadro 1. Tratamientos

Tratamientos	Sustrato
T0	Alperujo + Rastrojo de Betarraga
T1	Digestato ¹

¹Residuo sólido digerido en el biodigestor correspondiente a alperujo y rastrojo de betarraga.

La mezcla que se utilizó para el tratamiento testigo (T0), tuvo una relación carbono/nitrógeno de 30/1. Para determinar la cantidad de cada materia prima necesaria se utilizó la ecuación de carbono/nitrógeno de una muestra compuesta:

$$\frac{30}{1} = \frac{M_1N_1 + M_2C_2}{M_1N_1 + M_2N_2}$$

C : Porcentaje de carbono presente en la materia prima.

N : Porcentaje de nitrógeno presente en la materia prima.

M : Masa de la materia prima.

El porcentaje de carbono orgánico de las muestras de residuo de betarraga y alperujo se obtuvo mediante el método de calcinación a 600° C durante 2 horas. El porcentaje de nitrógeno se obtuvo de los análisis realizados por el laboratorio AGROLAB. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentaje de carbono orgánico y nitrógeno de las materias primas.

	Alperujo	Rastrojo de betarraga
% Carbono orgánico	51.72	42
% Nitrógeno	0.55	3.48

De la ecuación de relación de carbono/nitrógeno, se obtuvo que para la mezcla se utilizaron 500 Kg. de alperujo y 280 Kg. de residuo de betarraga, para obtener una relación adecuada de carbono/nitrógeno igual a 30/1.

Una vez calculadas las estimaciones de material a utilizar, el proceso de compostaje se llevó a cabo, mediante la elaboración de pilas. En cuanto a la pila correspondiente al tratamiento T1, se elaboró una vez extraído el material sólido de los biodigestores (Figura 1). El volteo se realizó de forma manual en función de la temperatura, con el objetivo de que se generaran las condiciones aeróbicas necesarias, permitiendo el ingreso y circulación de aire al interior de las pilas. De esta manera, se evitaron condiciones de fermentación anaeróbica que alterarían el producto final. Además, para asegurar la oxigenación, en cada pila se introdujo un tubo con agujeros.



Figura 1. A la izquierda T0 (materias primas frescas). A la derecha T1 (residuos generados del proceso fermentativo: digestato).

El procedimiento de riego no fue idéntico para las cuatro pilas, éste se realizó en función del contenido de agua de cada una de ellas. Para ello se midió el contenido de agua de forma empírica, a través del tacto, manteniendo un porcentaje entre un 45–55%, el cual se considera favorable para la actividad microbiana (Varnero, 2005). Las pilas fueron cubiertas con malla en períodos de lluvia, para evitar la sobresaturación y compactación.

Parámetros controlados durante el proceso de compostaje

Para el monitoreo de cada una de las pilas, se tomaron 3 submuestras en distintos puntos de la pila, elegidos al azar. De esta manera, se obtuvo una muestra representativa a partir de la cual se efectuaron los análisis físicos, químicos y biológicos.

Propiedades Físicas

Temperatura. Para realizar los monitoreos de temperatura se introdujo el vástago de un termómetro digital en seis puntos seleccionados; cinco puntos a 20 cm de profundidad y un punto a 40 cm de profundidad.

Se realizaron mediciones diarias a la misma hora, esto último con el objeto de evitar influencias medioambientales en el registro de datos.

En función de esta labor se pudo inferir cuando era necesario realizar los volteos, puesto que descensos en la temperatura indican que la actividad microbiológica ha decaído. Por lo tanto, es necesario mezclar aquellas capas externas frías, no descompuestas con el núcleo central más biodegradado, reiniciando de esta manera el proceso de conversión microbiológica (Santibáñez, 2002).

Contenido de agua. La medición del contenido de agua se realizó mediante el método gravitatorio a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, según TMECC03.09 (TMECC, 2004).

Propiedades Químicas

pH. El método utilizado para la medición de este parámetro fue TMECC 04.11 (TMECC, 2004). Se realizaron mediciones periódicas en función de los volteos, como indicador del proceso, puesto que si el pH está por debajo 4,5 la condición del proceso cambia a anaeróbica (Santibáñez, 2002).

Se utilizó un phmetro para medir este parámetro en un extracto de compost en una relación de 1: 5, mezclando compost con agua destilada.

Conductividad Eléctrica Este parámetro químico se determinó con un conductivímetro previamente calibrado, utilizándose el mismo extracto acuoso empleado en la medición de pH. Fue medido de acuerdo al método TMECC 04.10 planteado por TMECC (2004). Se realizaron mediciones periódicas en función de los volteos.

Materia Orgánica El porcentaje de materia orgánica se calculó mediante la metodología planteada por TMECC 0.507-A (TMECC, 2004).

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

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

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

Nitrógeno total Los análisis de nitrógeno fueron realizados en el laboratorio AGROLAB. Se determinaron mediante el método TMECC 04.02-D (TMECC, 2004).

Propiedades Biológicas

Actividad Biológica Se determinó a través de un ensayo de respirometría, mediante la cuantificación de desprendimiento de CO₂, según TMECC 05.08-B (TMECC, 2004)

Una de las formas utilizadas para medir indirectamente la actividad biológica de un material, es la cuantificación del desprendimiento de CO₂. El gas es desprendido en la respiración de los microorganismos presentes en una muestra de compost. Esta cuantificación es usada como un indicador de la estabilidad e índice de madurez del compost.

Los resultados de desprendimiento de CO₂ se expresaron como: mg C-CO₂/ g MO/día

Ensayo de Fitotoxicidad. Se determinó a través de la metodología de índice de germinación planteada por Varnero (2005).

A través de este bioensayo, se logró detectar la presencia de sustancias fitotóxicas, para lo cual se utilizaron dos especies indicadoras sensibles, rabanito (*Raphanus sativus*) y lechuga (*Lactuca sativa*), de rápido crecimiento y fácil manejo. Estas especies permitieron advertir la presencia de sustancias fitotóxicas mediante efectos negativos que provocan sobre la germinación y crecimiento de las semillas.

Se determinó el nivel de fitotoxicidad a través de las siguientes fórmulas:

Porcentaje de Germinación relativo (GR)

$$GR(\%) = \frac{N^{\circ} \text{ DE SEMILLAS GERMINADAS EN EXTRACTO}}{N^{\circ} \text{ DE SEMILLAS GERMINADAS EN TESTIGO}} \times 100$$

Además, se determinaron los siguientes parámetros para asegurar la ausencia de metabolitos fitotóxicos.

Largo de radícula relativo (ER):

$$ER(\%) = \frac{LARGO \text{ PROMEDIO DE RADÍCULAS EN EXTRACTO (cm)}}{LARGO \text{ PROMEDIO DE RADÍCULAS EN TESTIGO (cm)}} \times 100$$

Índice de germinación (IG):

$$IG = \frac{GR \times ER}{100}$$

De acuerdo al índice de germinación es posible determinar nivel de fitotoxicidad (Cuadro 3).

Cuadro 3. Nivel de Fitotoxicidad

Índice de Germinación	Nivel de Fitotoxicidad
$IG \leq 50$	Presencia de sustancias fitotóxicas
$50 < IG < 80$	Presencia de sustancias fitotóxicas moderada
$IG \geq 80$	Ausencia de sustancias fitotóxicas

Una vez analizadas las propiedades físicas, químicas y biológicas anteriormente señaladas, se clasificaron los productos obtenidos de acuerdo a la Normativa Chilena de Compost NCh 2880 (2004).

De acuerdo a su nivel de calidad, el compost se clasifica en las Clases siguientes:

Compost Clase A: producto de alto nivel de calidad. Su conductividad eléctrica debe ser menor a 3dSm^{-1} y su relación carbono/nitrógeno debe ser menor o igual a 25. Este producto no representa restricciones de uso.

Compost Clase B: producto de nivel intermedio de calidad. Su conductividad eléctrica debe ser menor a 8dSm^{-1} y su relación carbono/nitrógeno debe ser menor o igual a 30. Este producto puede representar restricciones de uso.

Análisis Estadísticos

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con los siguientes datos: pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. A través de estos análisis se determinó si se presentaron diferencias significativas en las características de los productos obtenidos por los tratamientos al finalizar el estudio. Se utilizó un porcentaje de confiabilidad de un 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas

Temperatura

A través de la medición periódica de temperatura interna de las pilas, se aprecia que los tratamientos analizados se diferenciaron en la duración de las etapas del proceso de compostaje (Figura 2). El tratamiento testigo T0, tuvo una etapa mesofílica de una duración de 80 días promedio entre las tres repeticiones. Luego comenzó la etapa termofílica que duró 45 días promedio. En cambio, el tratamiento T1 no tuvo etapa mesofílica. El material sacado de los biodigestores ingresó al proceso de compostaje con una temperatura termofílica de 52,9°C. La etapa termofílica en este tratamiento duró 51 días. En ambos tratamientos la temperatura se mantuvo entre el rango termofílico óptimo señalado por la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004) de 45 a 65°C, y se constató una gran actividad biológica por parte de los microorganismos termofílicos que biodegradaron las fracciones orgánicas de menor estabilidad, tales como productos celulósicos, hemicelulósicos y productos ricos en azúcares y proteínas.

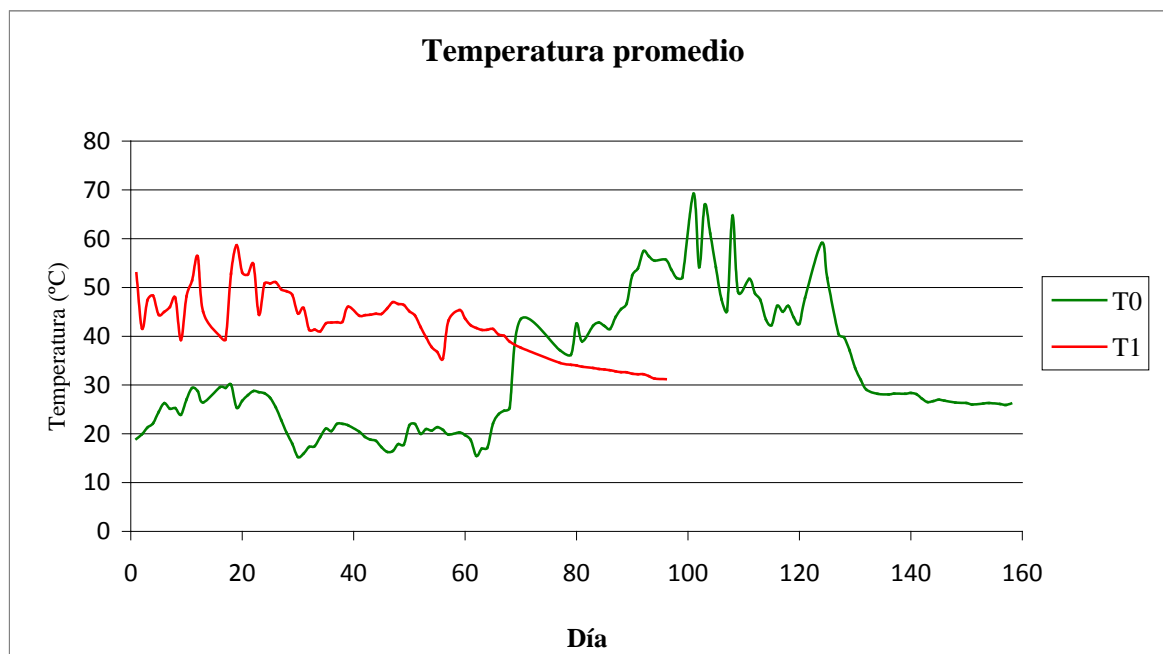


Figura 2. Evolución de temperatura promedio para tratamiento T0 y tratamiento T1.

La etapa mesofílica del tratamiento testigo T0 tuvo una larga duración de 80 días, evidenciando el difícil manejo de este residuo, dado en primer lugar por su alto porcentaje de compuestos lipídicos y ácidos orgánicos, y por su alta susceptibilidad a la compactación debido al pequeño tamaño de partículas, escasa porosidad y al alto contenido de humedad, tal como indica Alburquerque *et al* (2004) en sus estudios realizados.

Tanto el tratamiento T0 y tratamiento T1 manifestaron la presencia de hongos y actinomicetas. Estos microorganismos son claves para eliminación de microorganismos patógenos fitotóxicos, pues actúan cuando las formas lábiles de carbono se han agotado, descomponiendo formas resistentes como celulosa y lignina. (Varnero, 2005)

La presencia de hongos (Figura 3) en residuos es muy diversa y su capacidad de proliferación es elevada debido a las condiciones favorables de humedad y presencia de materias orgánicas, así como a su gran adaptación en condiciones variables de pH (2-9), siendo el óptimo el pH de 5,6 (Tchganoglous *et al*, 1998, citado por Comando, 2006)). Es decir, son muy resistentes a los factores ambientales y muy resistentes en el medio. Además, por presentar una gama de adaptabilidad en el medio ambiente, los hongos pueden degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos existentes en los residuos. (Comando, 2006).



Figura 3. Hongos presentes en el proceso de compostaje

La medición de la temperatura fue un factor clave para determinar el momento en que era indicado realizar los volteos de las pilas. Esta acción permitió la entrada de oxígeno necesario para la adecuada actividad de los microorganismos. En la Figura 2 es posible visualizar que una vez efectuados los volteos existe un ascenso de temperatura interna de la pila.

En ambos tratamientos, una vez terminada la etapa termofílica, comenzó la etapa de enfriamiento. En el tratamiento testigo T0 la caída de temperatura fue más abrupta que en el

tratamiento T1 que tuvo un descenso de temperatura más paulatino. Se pudo observar que en esta etapa los volteos ya no producen mayores variaciones en la temperatura interna de las pilas, la temperatura tiende a estabilizarse y equipararse con la temperatura atmosférica.

Contenido de agua

En el tratamiento testigo T0, el porcentaje de contenido de agua de las materia primas recepcionadas fue de 69% para el alperujo y de 89% para la betarraga. Estos materiales poseen un alto contenido de humedad, lo cual dificulta una correcta oxigenación. Por ello, los materiales fueron dejados extendidos al aire libre por una semana aproximadamente hasta que fueron conformadas las pilas. El porcentaje de humedad inicial promedio de las tres repeticiones fue de 56%.

Por otra parte, material proveniente de los biodigestores tenía un contenido de agua de 84%. Este fue filtrado para eliminar el exceso de efluente y se reservó solo el digestato para la conformación de las pilas. Luego, el porcentaje de contenido de agua de la pila correspondiente al tratamiento T1 fue de 47%.

El porcentaje de contenido de agua de los dos tratamientos se mantuvo entre un 45-55% durante el proceso de compostaje. Según Frioni (1990), la consideración de este parámetro es fundamental para mantener la actividad microbiana, pues el agua es un nutriente esencial y las reacciones bioquímicas requieren de medios acuosos para poder realizarse. Sin embargo, cuando los aportes de agua son excesivos la difusión de oxígeno se ve limitada, creándose condiciones de anaerobiosis que pueden desencadenar procesos fermentativos inhibitorios para los microorganismos aeróbicos.

El porcentaje de contenido de agua durante el proceso fue difícil de controlar, pues la ausencia de materiales estructurantes, contribuyó a que el material formara agregados de partículas que redujeran la superficie de contacto al momento de ser efectuados los riegos. Como señala Galleguillos (2008), la presencia de estructurantes permite optimizar los procesos de compostaje, obteniendo un material estable en menor tiempo. Por este motivo, es posible argumentar que, debido a la ausencia de materiales estructurantes, el proceso tuvo una lenta velocidad de degradación.

La Norma Chilena de Compost (INN, 2004), establece que un producto totalmente compostado debe tener entre un 30 y 45% de contenido de agua, base seca. El porcentaje de contenido de agua promedio del tratamiento T0 fue de 36% y para el tratamiento T1 de 31%. De esta manera, ambos tratamientos presentaron valores acordes a las exigencias establecidas por la norma.

Propiedades Químicas

pH

Los valores de pH medidos al inicio de cada tratamiento indican que el tratamiento testigo T0 tenía un pH promedio de 6,2; el cual corresponde a un pH moderadamente ácido. Esto se debe mayoritariamente a la presencia de ácidos orgánicos presentes en el alperujo (Albuquerque *et al*, 2006b).

En la Figura 4 se observa que hasta la undécima semana hubo un aumento gradual de pH de las tres repeticiones, alcanzando valores moderadamente alcalinos cercanos a la neutralidad de 7,4. Albuquerque *et al.* (2006a) describen que este fenómeno se produce por la degradación de compuestos ácidos y por la incipiente liberación de amonio. A partir de la décimo cuarta semana se observa un gradual descenso del pH, obteniendo un producto final estabilizado con pH moderadamente ácido de 6,5.

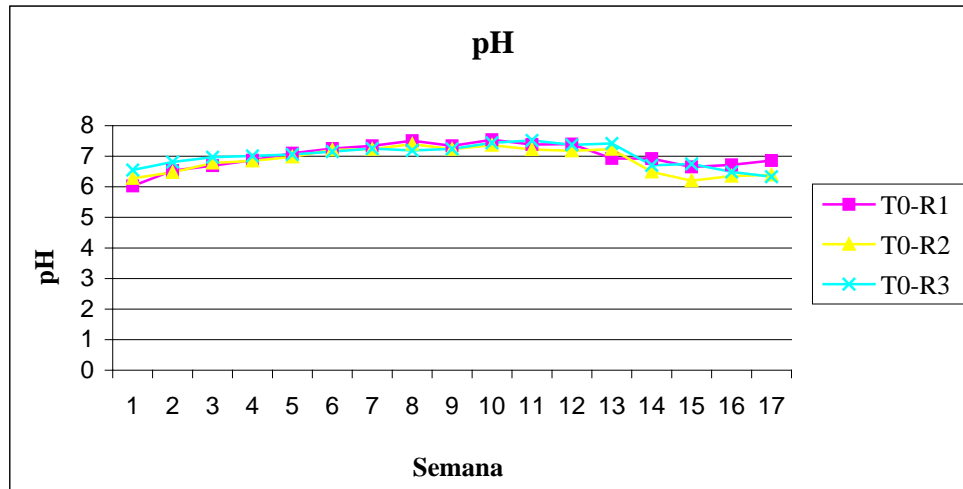


Figura 4. Evolución de pH del tratamiento T0 durante el proceso de compostaje

En cambio en el tratamiento T1 se determinó un pH inicial de 6,6, correspondiente a neutro. Este valor de pH indica que el proceso de obtención de biogás se dio a lugar en condiciones controladas de fermentación anaeróbica, manteniendo un pH bastante estable, debido a que las bacterias son capaces generar sustancias tampones que garantizan un rango de pH adecuado (Comando, 2006). De esta manera, el pH del digestato con el cual se conformó la pila perteneciente al tratamiento T1 es favorable para el proceso. Los valores de pH medidos entre la quinta y undécima semana se mantuvieron en el rango correspondiente a moderadamente ácidos, este descenso puede ser atribuible a la respiración de microorganismos, puesto que los procesos metabólicos generan CO₂ y ácidos orgánicos solubles acidificantes (Zapata, 2006). Luego, al finalizar el proceso de compostaje, se determinó un pH de 7,1 correspondiente a neutro. (Figura 5).

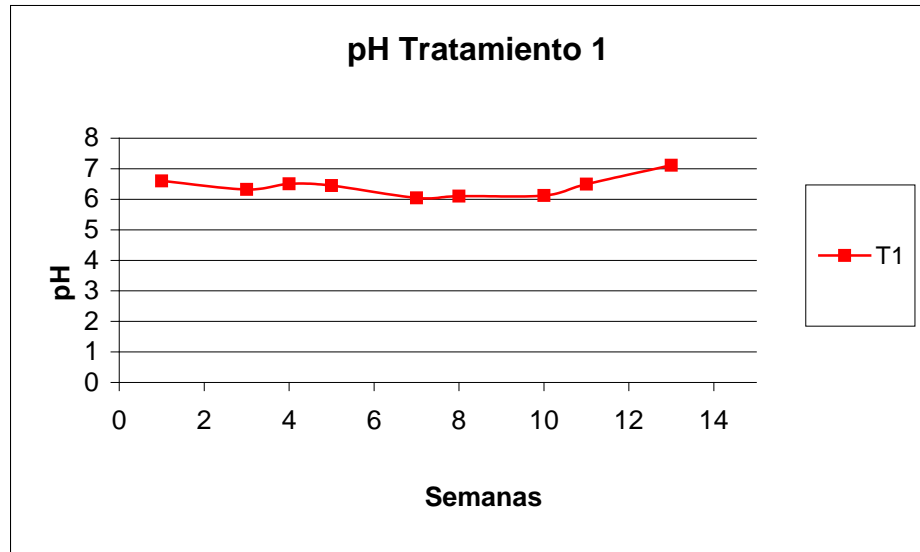


Figura 5. Evolución de pH del tratamiento T1 durante el proceso de compostaje.

Además, es necesario destacar que en ninguno de los dos tratamientos se produjo valores que sobrepasaran el valor 8,5. El comportamiento de las formas nitrogenadas ión amonio/amoniaco ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) está gobernado por el balance que existe de pH. Así, valores que sobrepasen un pH igual a 8,5 podrían provocar la pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco gaseoso, lo cual implica la presencia de malos olores (Santibáñez, 2002; Havlin, 2005).

Por último, es posible apreciar en este estudio, que los valores de compost se ajustaron a la Normativa Chilena de Compost (INN, 2004), ya que ésta exige que los materiales estabilizados deben presentar un pH entre 5,0 y 8,5. (Figura 6).

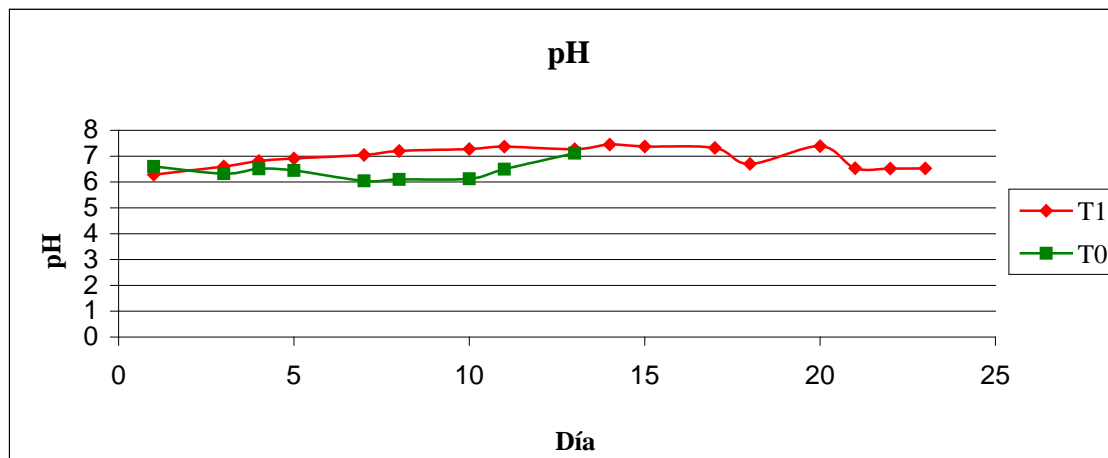


Figura 6. Comparación de la evolución de pH promedio de tratamiento T0 y tratamiento T1, durante el proceso de compostaje.

Para evaluar este parámetro se utilizaron datos muestrales correspondientes a las semanas que duró el proceso de compostaje en cada tratamiento (Apéndice II). En el caso de T0 se evaluaron 23 datos y en el caso de T1 se evaluaron 13 datos.

Se realizó un ANDEVA (Apéndice III) con un porcentaje de confiabilidad correspondiente a 95% ($\alpha=0,05$). Al relacionar el estadígrafo F calculado (13,5) respecto al estadígrafo F tabulado crítico (4.259), se puede concluir que se rechaza la hipótesis nula, aceptando que sí existe diferencia significativa entre ambos tratamientos evaluados. Esta diferencia se apreció durante el tiempo que duró el proceso de degradación de los residuos. En el caso de T0 los valores son ligeramente ácidos, luego aumenta a valores neutros y ligeramente alcalinos, hasta terminar el proceso con valores neutros. A diferencia de T1, en el cual, el proceso comienza con valores neutros, luego desciende a valores ligeramente ácidos y finaliza el proceso con valores neutros.

Sin embargo, esta diferencia significativa no es determinante al momento de clasificar el producto final de acuerdo a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004), puesto que ambos tratamientos responden a los valores de pH (5- 8,5) contemplados en los rangos de aceptación.

Conductividad Eléctrica

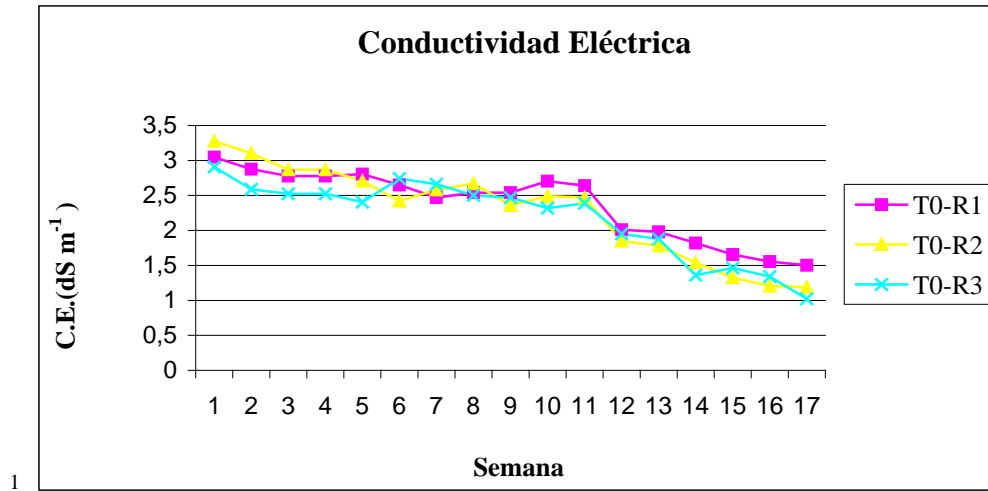
Tanto en la Figura 7 como en la Figura 8, correspondientes a la evolución de la conductividad eléctrica de los tratamientos T0 y T1 respectivamente, se puede apreciar que este parámetro descendió conforme transcurrió el tiempo. En el tratamiento T0 la conductividad eléctrica del material inicial fue de 3,1 dS m⁻¹ en promedio, obteniéndose un producto final con un valor de 1,24 dS m⁻¹. En relación al tratamiento T1, se observa que la conductividad eléctrica inicial fue de 2,75 dS m⁻¹ y el valor final de 0,99 dS m⁻¹. Como señala Alburquerque *et al.* (2006a), esta disminución está relacionada con la disminución de iones solubles durante la proliferación de los microorganismos, o a la precipitación de minerales. Según la escala establecida por Richards (1954, citado por Viteri *et al* 2008), en el rango de 0 a 2 dS m⁻¹ los efectos de salinidad son despreciables, por lo que no existiría restricciones para la elección de cultivos al ocupar el producto terminado.

Para evaluar este parámetro se utilizaron los datos muestrales correspondientes a las semanas que duró el proceso de compostaje en cada tratamiento (Apéndice IV). En el caso de T0 se evaluaron 23 datos y en el caso de T1 se evaluaron 13 datos.

Se realizó un ANDEVA (Apéndice V) con un valor de confianza correspondiente a 95% ($\alpha=0,05$) y se comparó el estadígrafo F calculado (18,69) respecto al estadígrafo F tabulado crítico (4,25), concluyéndose que se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, existe diferencia significativa entre ambos tratamientos evaluados. Esta diferencia se apreció durante todo el proceso, pues los valores de T0 son estadísticamente mayores que los valores presentados

por T1. En el caso de T0 el proceso comienza con valores que representan restricciones a ciertos cultivos, hasta descender de manera paulatina; en cambio, T1 presenta en todo el proceso valores menores, siendo el descenso más abrupto hasta llegar a valores que se relacionan con una alta disminución de los iones de nutrientes solubles fijos durante la rápida proliferación de la población microbiana aeróbica.

No obstante, al igual que en el caso de pH, esta diferencia significativa entre ambos tratamientos no es determinante al momento de clasificar el compost, puesto que los dos tratamientos cumplen con los requisitos requeridos por la Norma Chilena de Compost (INN, 2004), teniendo una conductividad eléctrica menor a 3 dS m^{-1} .



1.

Figura 7. Evolución de conductividad eléctrica del tratamiento T0 durante el proceso de compostaje

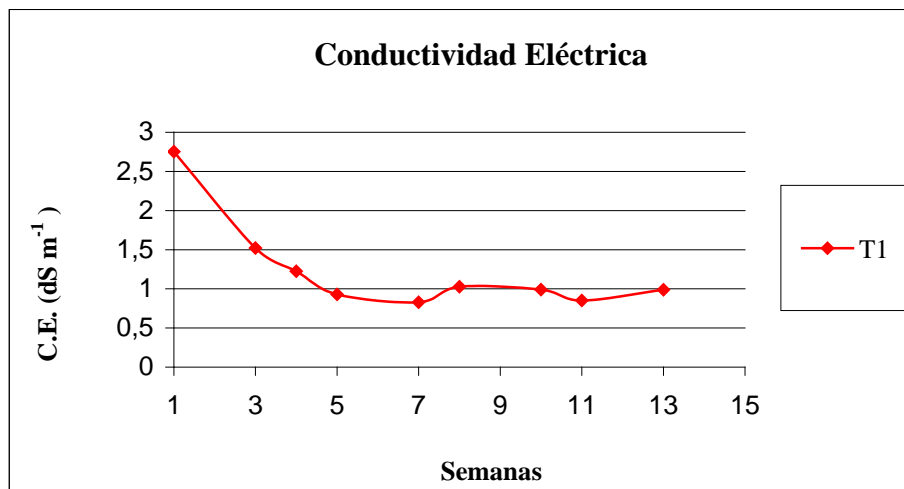


Figura 8. Evolución de conductividad eléctrica del tratamiento T0 durante el proceso de compostaje.

Materia Orgánica

Es posible observar que el contenido de materia orgánica en los tratamientos disminuye conforme transcurre el tiempo. Estas pérdidas pueden ser asociadas a las transformaciones que ocurren en la etapa termofílica (Cegarra *et al.*, 2006), debido principalmente a que los microorganismos mediante procesos oxidativos de respiración obtienen energía, descomponiendo las moléculas orgánicas que generan principalmente carbono y agua.

Las materias primas utilizadas para la elaboración de las pilas del tratamiento T0 presentaron valores altos de materia orgánica. La cantidad de materia orgánica del alperujo fue de 93,1% y de betarraga de 75,6%. Una vez conformadas las pilas del tratamiento T0 se registró que éstas tenían una cantidad de materia orgánica promedio de 89,1%. La materia prima del tratamiento T1 (digestato) fue de 92,6%.

En la Figura 9 se observa que ambos tratamientos sufrieron una disminución en el contenido de materia orgánica. En el tratamiento T0 se determinó un contenido de materia orgánica promedio final de 62,4% y en el tratamiento T1 un 67,7%. En el caso del tratamiento T0 la caída fue gradual hasta la séptima semana, esto se podría explicar debido al largo período que tuvo la etapa inicial mesofílica del proceso, en la cual los microorganismos no ejercieron mayor poder degradativo de los compuestos orgánicos.

En ambos tratamientos se registró un comportamiento similar en cuanto al descenso de contenido de materia orgánica. Para este parámetro se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con los datos muestrales correspondientes a las semanas que duró el proceso de compostaje (Apéndice VI). En el caso de T0 se evaluaron 23 datos y en el caso de T1 se evaluaron 14 datos.

Se realizó un ANDEVA (Apéndice VII) con un porcentaje de confiabilidad correspondiente a 95% ($\alpha = 0,05$). Al comparar el estadígrafo F calculado (0,0037) respecto al estadígrafo F tabulado crítico (4,38) se puede concluir que se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, durante todo el proceso de compostaje tanto los valores de T0 como de T1 de contenido de materia orgánica no tuvieron estadísticamente una diferencia significativa.

De acuerdo a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004), los materiales compostados deben tener un contenido de materia orgánica igual o superior al 20%. Como se aprecia en la Figura 9 ambos tratamientos cumplen con los requerimientos exigidos por la normativa.

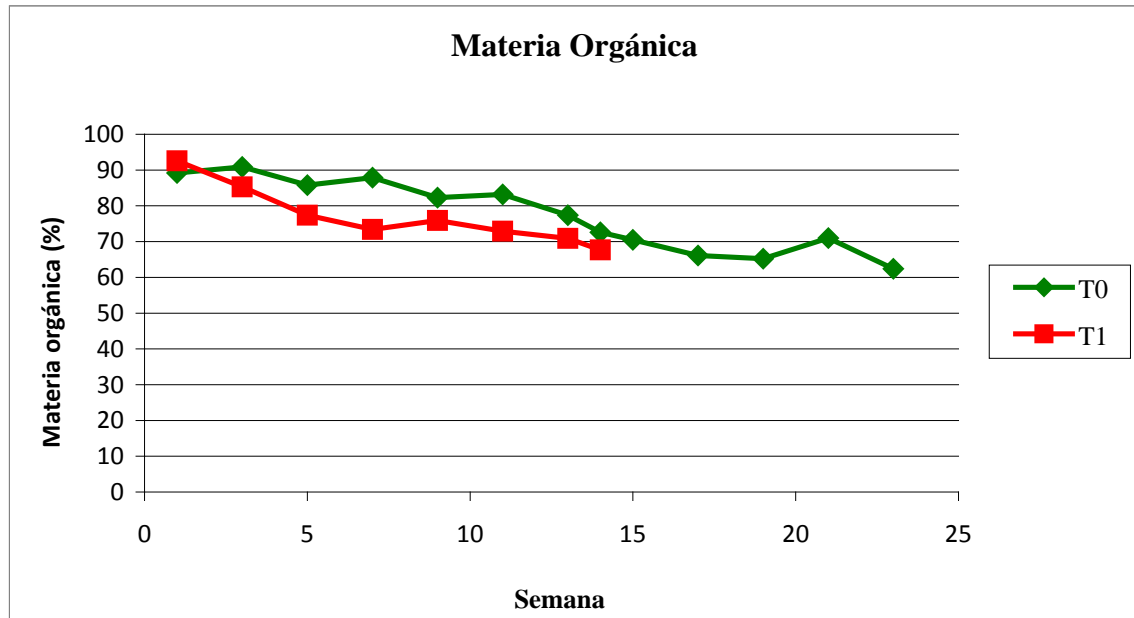


Figura 9. Evolución de Materia Orgánica en tratamiento T0 y tratamiento T1 durante el proceso de compostaje.

Carbono Orgánico

El carbono orgánico es utilizado como fuente de energía por los microorganismos responsables de la biodegradación oxidativa de las moléculas orgánicas. (Varnero, 1992) Éste se libera al medio en forma de dióxido de carbono y su liberación es proporcional a la disminución del contenido de carbono orgánico.

En el caso del tratamiento T0 las materias primas iniciales tuvieron los siguientes valores de carbono orgánico: alperujo 51,72% y betarraga 42%. Al momento de montar las pilas se registró un valor inicial de 49,6%. El tratamiento T1 tuvo un valor de 51,4% inicial al momento de conformar la pila. El tratamiento T0 tuvo una mayor disminución del contenido de carbono orgánico, obteniendo un valor de 34,7%, mientras que en el tratamiento T1 se observó un contenido de 37,6%. De acuerdo a los valores obtenidos, es posible afirmar que en el T1 hubo una mayor degradación y estabilización del producto, pues la disminución fue mayor. No obstante, ambos valores finales son más bien altos en comparación con otros compost hechos de estiércol de animales y residuos de la ciudad, reflejando la proporción sustancial de lignina remanente en el compost maduro de alperujo (Alburquerque *et al*, 2006a).

Nitrógeno total

Los contenidos de nitrógeno de las materias primas para la elaboración de las pilas correspondientes al tratamiento T0 fueron los siguientes: alperujo 0,55% y rastrojo de betarraga 3,48%. Debido al bajo porcentaje de nitrógeno que presenta el alperujo se escogió rastrojo de betarraga para aumentar el contenido de este nutriente en la mezcla. Para el caso del tratamiento T1 se determinó que el digestato utilizado en la elaboración de la pila obtuvo un contenido de nitrógeno de 1,07%.

En los dos tratamientos se observó que el contenido de nitrógeno aumentó. Los contenidos de nitrógeno de los productos finales fueron los siguientes: tratamiento T0 1,17% y tratamiento T1 1,55%. Estos valores permiten inferir que no hubo pérdida de nitrógeno a la atmósfera en forma de gas amoníaco. El rastrojo de betarraga que se utilizó en el proceso anaeróbico, previo al proceso de compostaje, tenía un contenido de nitrógeno total de 1,07%. Por lo tanto, el tratamiento anaeróbico seguido del proceso aeróbico aumentó en mayor cantidad el porcentaje de nitrógeno del producto final. Esto debido a que hubo una degradación mayor del material, optimizando el desarrollo y crecimiento de las poblaciones microbianas, generándose un mayor desprendimiento de carbono mineral en forma de CO₂.

Relación Carbono/ Nitrógeno

Es necesario mantener una relación carbono/nitrógeno adecuada, de esta manera se favorece el buen crecimiento y desarrollo de la población microbiana durante el proceso de compostaje (Varnero, 2005). En el tratamiento T0 se utilizó una mezcla de alperujo/rastrojo de betarraga con una relación carbono/nitrógeno igual a 30/1, la cual otorgó la fuente de energía (sustancias carbonadas) necesaria para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos y el nitrógeno necesario para la síntesis de proteínas. En el caso del tratamiento T1, la relación C/N que se utilizó en el proceso de fermentación fue de 30/1 y una vez que el material se sacó y se utilizó para compostarlo se determinó que su relación C/N era de 48,1. Este último mayor valor indica, que puede haber ocurrido inmovilización de nitrógeno (Varnero, 1992).

En consecuencia, es posible afirmar que a medida que la descomposición de la materia orgánica progresó, la cantidad de carbono disminuyó, principalmente en su forma como dióxido de carbono, lo cual se tradujo en una disminución de la relación C/N (Raj, 2011).

Como se observa en el Cuadro 4, al terminar el proceso de compostaje se determinó que en ambos tratamientos existió una disminución de la relación carbono/nitrógeno. La disminución en el tratamiento T1 fue mayor, esto podría explicarse por la mayor degradación que sufrieron los compuestos orgánicos sometidos a una degradación tanto anaeróbica como aeróbica, debido al aprovechamiento máximo de los residuos utilizados (Comando, 2006)

Cuadro 4. Valores promedio de la Relación Carbono/Nitrógeno obtenidos durante el proceso de compostaje.

Relación Carbono/Nitrógeno		
	T0	T1
Materia prima	30	48,1
Producto estabilizado	29,7	24,3

Una vez realizados los análisis anteriores, es necesario realizar ensayos complementarios para determinar la madurez y estabilidad de compost. La estabilidad puede ser definida como el grado en que el material fácilmente biodegradable se ha descompuesto. En relación a esto, un material se considera estable si la materia orgánica presente en el sustrato no es capaz de sostener la actividad microbiana y al contrario, se considera inestable si contiene una alta proporción de sustancias biodegradables que pueden sustentar una alta actividad microbiana (Barrena *et al*, 2006). Cuando los materiales compostados aún están inmaduros y son utilizados como enmiendas orgánicas o para el crecimiento de plantas, pueden reducir la concentración de oxígeno en el suelo e inmovilizar el nitrógeno, causando serias deficiencias nutricionales en los cultivos (Zucconi *et al*, 1981).

Para la evaluación de la madurez de los tratamientos de se ha escogido un ensayo de cada grupo, como se indica en el cuadro 5 siguiente:

Cuadro 5. Análisis complementarios para determinar madurez de compost.

Test del Grupo 1	Rangos de aceptación para compost
Evolución de CO ₂ (Respiración)	Menor o igual a 8 mg de C-CO ₂ /g de materia orgánica
Test del Grupo 2	
Germinación de rabanitos	Mayor o igual a 80%

Fuente: Norma Chilena de Compost NCh2880-(INN, 2004)

Evolución de CO₂ (Respiración)

La evolución de la respiración se mide a través del desprendimiento de CO₂ representando un indicador de la actividad de los microorganismos en la materia orgánica. Diversos autores afirman que la respiración es uno de los parámetros más antiguos y frecuentes usados para cuantificar la actividad microbiana de una población (Barrena *et al*, 2006; Zagal *et al*, 2002), puesto que contribuye a comprender la estabilidad y madurez de la materia orgánica según publicaciones realizadas por Woods End Research Laboratory. (2005).

En el Cuadro 6, es posible observar que tanto en el tratamiento T0 y T1 los valores correspondientes a desprendimiento de CO₂ están por debajo de 8 mg C-CO₂/ g MO/día, valor que exige la normativa chilena para considerar un compost estabilizado y maduro. Por lo tanto, es posible afirmar que ambos tratamientos tienen una muy baja actividad microbiológica, dando cuenta de que los microorganismos han agotado el stock de materia orgánica fácilmente descomponible (Barrena *et al*, 2006; Varnero *et al*, 2004).

Cuadro 6. Valores de Desprendimiento de CO₂

Tratamientos	mg C-CO ₂ / g MO/día
Tratamiento 0	0,51
Tratamiento 1	0,09

Ensayo de Fitotoxicidad

En el presente estudio se realizó un ensayo de fitotoxicidad con fin de evaluar la estabilidad biológica de los dos tratamientos de compost. Según Albuquerque *et al.* (2006b) la fitotoxicidad es uno de los criterios más importantes para evaluar la idoneidad de los materiales orgánicos para la agricultura. Además, es una valiosa forma de evaluar la etapa del proceso alcanzado, así como su eficiencia y condiciones. Este parámetro se ha relacionado principalmente con la presencia de sustancias fenólicas, ácidos orgánicos, amoníaco/amonio y metales pesados.

Si bien la Norma Chilena de Compost 2880 (2004) establece al rabanito como especie adecuada para realizar los análisis, también se efectuaron ensayos con semillas de lechuga.

Actualmente, dicha normativa establece la utilización del porcentaje de germinación como indicador de madurez. Sin embargo, además se utilizó el índice de germinación que integra el porcentaje relativo de germinación y el crecimiento relativo de las radículas. Esta integración de parámetros permite establecer tres niveles de fitotoxicidad: severa, moderada y baja o nula, lo cual es determinante cuando se utiliza el compost en maceteros, ya que en estos casos el efecto de fitotoxicidad posee mayor relevancia (Varnero, 2007). Sin embargo, los resultados obtenidos usando el índice de germinación deben ser interpretados con precaución, puesto que este índice se puede ver afectado por el tipo de semilla utilizada (Raj y Antil, 2011), como es el caso de utilización de semillas de lechuga, que dificultan el manejo dado su pequeño tamaño.

Análisis con semilla de rabanito. Estos ensayos (Figura 10) determinaron que el tratamiento T0 alcanzó a partir del quinto mes de tratamiento un porcentaje de germinación que indica ausencia de sustancias fitotóxicas (80%). En cambio, el tratamiento T1 tuvo una evolución más rápida, alcanzando un 85% de germinación en el tercer mes de tratamiento, constatando en ambos la ausencia de sustancias fitotóxicas en el material compostado. De

acuerdo a esto, es posible afirmar que la aplicación de estos materiales orgánicos, como enmiendas orgánicas en el suelo, no afectaría el desarrollo de cultivos. Ambos tratamientos cumplen con el porcentaje requerido sobre 80% que exige la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004) para clasificar a los producto como un material estable y maduro.

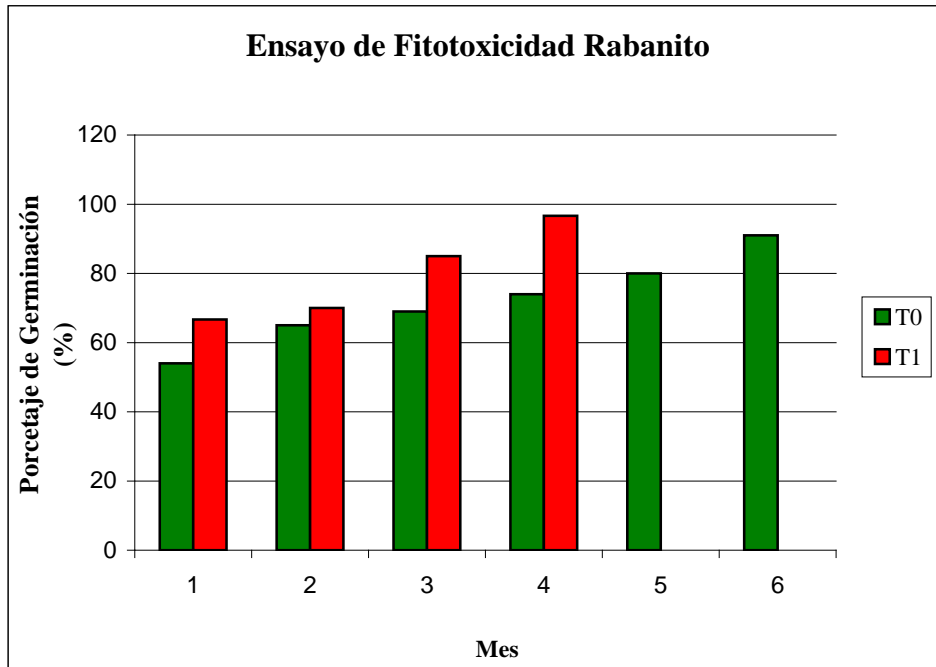


Figura 10. Ensayo de Fitotoxicidad realizado con rabanito para determinar el porcentaje de germinación.

En relación al índice de germinación (Figura 11), se determinó que el tratamiento T0 tiene presencia moderada de sustancias fitotóxicas, mientras que en el tratamiento T1 al tercer mes ya no existe presencia de sustancias fitotóxicas. Si bien en ambos tratamientos se observa un incremento gradual del índice de germinación, en el tratamiento T0 aún existen metabolitos moderadamente fitotóxicos que no impiden la germinación de semillas, pero sí la elongación de las radículas.

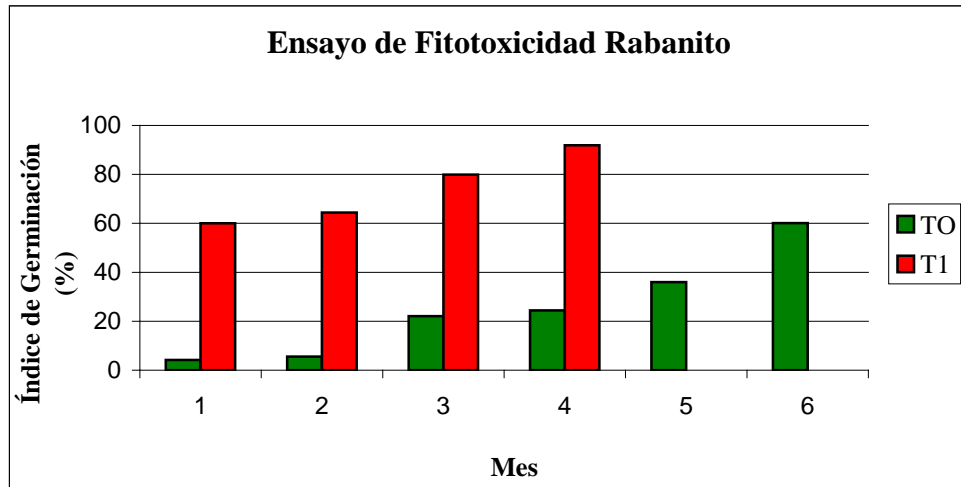


Figura 11. Ensayo de Fitotoxicidad realizado con rabanito para determinar el índice de germinación.

Análisis con semilla de lechuga. En cuanto a los ensayos realizados con semilla de lechuga (Figura 12), se determinó que al finalizar el tratamiento T0 aún existe moderada presencia de sustancias fitotóxicas, alcanzando un porcentaje de 63%. Estaún *et al* (1985) reportan que en estudios realizados en compostaje con alperujo, los efectos de fitotoxicidad en semillas de lechuga normalmente son atribuidos a lípidos, compuestos fenólicos y ácidos orgánicos. Por otra parte, el tratamiento T1 alcanzó un porcentaje de germinación de 80% al tercer mes, revelando ausencia de sustancias fitotóxicas, siendo este tratamiento el que se ajustó a la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004).

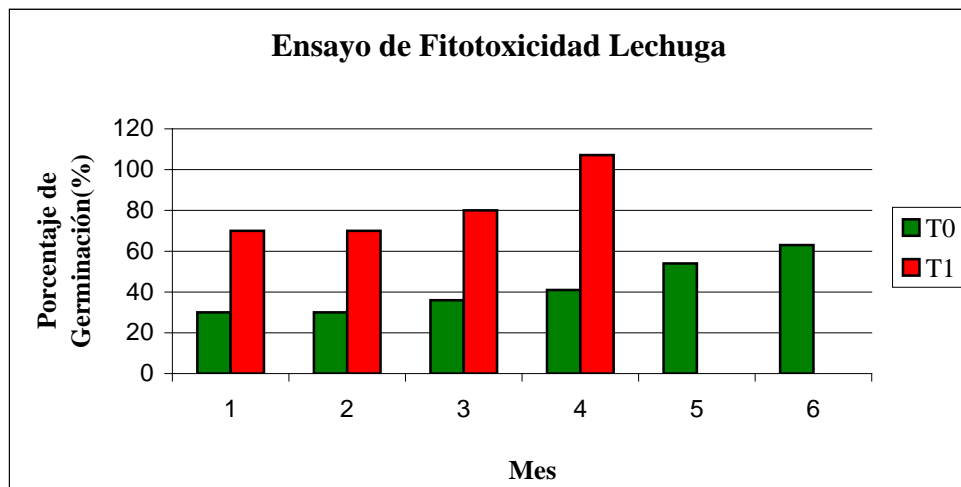


Figura 12. Ensayo de Fitotoxicidad realizado con lechuga para determinar el porcentaje de germinación.

Por último, se realizaron ensayos de germinación con semillas de lechuga para determinar el índice de germinación. Como se puede observar en la Figura 13, el tratamiento T0 tuvo una variación de 5 a 55%, estos valores permiten inferir que el material aún presenta metabolitos fitotóxicos de carácter moderado que impiden la elongación de las radículas. En cambio, en el tratamiento T1 el porcentaje de germinación varió entre 57 y 114%, dando cuenta de la ausencia absoluta de sustancias fitotóxicas a partir del cuarto mes. El valor obtenido de 114% indica que hubo un mayor crecimiento de radículas en el extracto de compost que en el testigo utilizado con agua destilada.

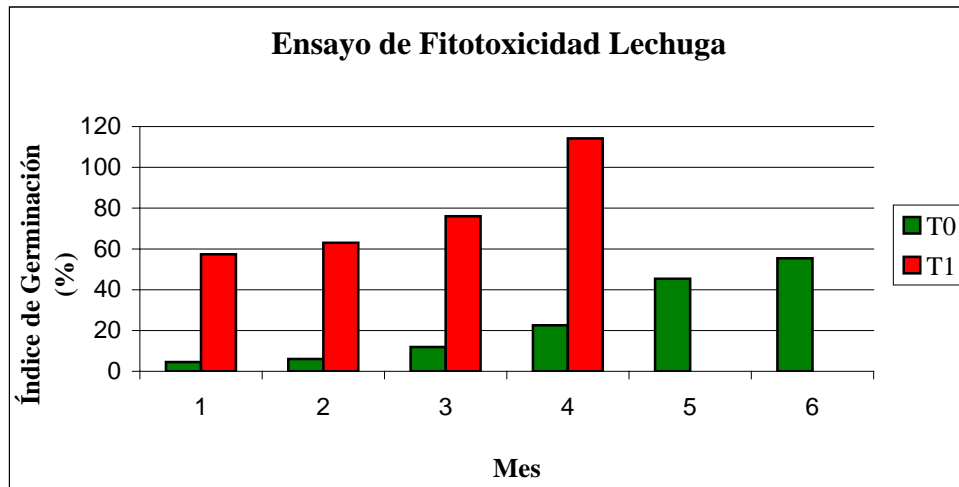


Figura 13. Ensayo de Fitotoxicidad realizado con lechuga para determinar el índice de germinación.

De acuerdo a los análisis obtenidos al finalizar el proceso de compostaje, los productos obtenidos de ambos tratamientos se ajustan a los rangos de aceptación que exige la Norma Chilena de Compost 2880 (INN, 2004), pudiendo establecer que el tratamiento T0 corresponde a un compost Clase B y el tratamiento T1 a un Compost Clase A. Al analizar los parámetros exigidos (Cuadro 7) se puede establecer que tanto el tratamiento T0 como el tratamiento T1 produjeron materiales compostados que se encuentran maduros y estables.

En el cuadro siguiente se presenta el resumen de los análisis de los materiales compostados, los cuales se realizaron mediante los criterios exigidos por la Norma Chilena de Compost 2880 (INN, 2004)

Cuadro 7. Caracterización de los parámetros químicos de los materiales compostados.

Tratamiento	T0	T1	Rango Norma (INN, 2004)
pH	6,5	7,1	5-8,5
CE (dSm⁻¹)	1,24	0,99	Clase A < 3dSm⁻¹, Clase B < 8dSm⁻¹
Humedad (%)	36	31	30-45%
Materia Orgánica (%)	62,4	67,7	> 20 %
Relación C/N	29,7	24,3	Clase A ≤25/1, Clase B ≤30/1
Porcentaje de germinación rabanito (%)	91	97	≥ 80%
Desprendimiento de CO₂ (C-CO₂/g MO/día)	0,51	0,09	≤ 8 mg de C-CO₂/g MO/día

CONCLUSIONES

1. El uso de digestato como materia prima para la elaboración de pilas de compostaje redujo en dos meses aproximadamente el tiempo de compostaje que se requiere para obtener un producto final maduro y estable.
2. La calidad y eficiencia del compost obtenido del tratamiento del digestato es mayor, de acuerdo a las normas establecidas por la Normativa Chilena de Compost 2880 (INN, 2004).
3. El uso combinado de los dos procesos de digestión (anaeróbico y aeróbico) permite el aprovechamiento máximo de los residuos, contribuyendo a la reducción de residuos generados en la industria olivícola. Primero se obtiene biogás y luego compost que aporta nutrientes asimilables por las plantas. Además, la técnica combinada de producción de biogás seguida de compostaje reduce los efectos de contaminación en el suelo, puesto que el material tiene menor tiempo de contacto con la superficie. Los lixiviados que se producen en el proceso de compostaje son menores y de menor efecto tóxico para el suelo y las napas freáticas adyacentes.
4. El compost obtenido de ambos tratamientos puede servir como enmienda orgánica, puesto que se trata de un producto maduro y estable para utilizar con fines agronómicos.
5. Para la producción de compost de alperujo es recomendable utilizar materiales estructurantes, puesto que la aireación es un factor clave en el proceso. La oxigenación incide directamente en los procesos microbiológicos y en la duración de las etapas de los procesos de compostaje.
6. El compostaje de alperujo y de los residuos generados en la producción de biogás (digestato), resulta una buena estrategia para aprovechar de manera eficaz y eficiente los subproductos producidos por la industria de aceite de oliva.

BIBLIOGRAFÍA

Albuquerque, J. A., González, J., García, D. 2004. Agrochemical characterisation of alperujo, a solid by-product of the phases centrifugation method for olive oil extraction. *Bioresource Technology*. 91: 195-200.

Albuquerque, J. A., González, J., García, D. 2006a. Composting of a solid olive-mill by product (“alperujo”) and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions. *Waste Managment* 26: 620-626.

Albuquerque, J. A., González, J., García, D., Cegarra, J. 2006b. Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemospher* 64: 470-477

Aranda, E. 2006. Fraccionamiento físico del alpeorujo como base para desarrollar una estrategia biológica con hongos saprobios y arbusculares para la eliminación de su fitotoxicidad. Memoria para optar al grado de Licenciada en Ciencias Biológicas. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Granada, España. 281p.

Barrena R, F Vázquez, A Sánchez. 2006. The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Managment and Research* 24: 37-47.

Cegarra, J., Albuquerque, J.A., González, 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* 26 (12): 1377-1383.

Comando, A. 2006. Optimización del compostaje de residuos sólidos urbanos. Tesis para optar al Grado de Doctor. Universidad politécnica de Madrid. Escuela Superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid, España. 407 p.

Estaún, V., Calvet, C., Page´s, M., Grases, J.M. 1985. Chemical determination of fatty acids, organic acids and phenols, during olive marc composting process. *Acta Horticulturae* 172: 263–270.

Frioni, L. 1990. Ecología microbiana del suelo. Departamento de publicaciones y ediciones de la Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. 519 p.

Galleguillos, K. 2008. Incidencia de agentes estructurantes en el proceso de compostaje de alperujo. Seminario de título Biólogo, Mención en Medio Ambiente. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias. Santiago, Chile. 91 p.

Guerrero, D. 2010. Producción de Biogás a partir de una mezcla de alperujo con residuos de hortalizas, a través de un proceso de fermentación metánica. Proyecto de Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 9p.

Havlin, J. 2005. Soil fertility and fertilizer: and introduction of nutrient management. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 515 p.

Instituto Nacional de Normalización Chile. Nch2880 Of2004 Compost, Clasificación y Requisitos Santiago, Chile: INN, 2004. 19 p.

ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2010. Aceite de Oliva en Chile. Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2394.pdf>. Leído el 08 de agosto de 2012.

O’Ryan, J. 2007. El compostaje y su utilización en agricultura. Manuales FIA de apoyo a la formación de Recursos Humanos para la Innovación Agraria. Fundación para Innovación Agraria. Universidad de las Américas. 36 p.

Raj, D and Antil, R.S. (2011) Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*. 102: 2868-2873

Santibáñez, F. y Uribe, J. 1990. Atlas Agroclimático de Chile. Regiones V y Metropolitana. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile. 65 p

Santibáñez, C. 2002. Diseño y evaluación de una planta piloto de compostaje para tratamiento de residuos de origen vegetal. Seminario de Título Químico Ambiental. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Santiago, Chile. 93p.

TMECC. 2004. Test methods for the Examination of Composting and Compost. U.S. Composting Council Research and education Foundation. Disponible en: <http://www.tmecc.org>. Leído el 05 de Mayo de 2012.

Varnero, M. 1992. El suelo como sistema biológico. pp. 197-214 *In*: Vera, W. (ed). Suelos una visión actualizada del recurso. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile, 341 p.

Varnero, M. 2001. Desarrollo de substratos orgánicos: Compost y Bioabonos. *In*: Experiencias Internacionales en la Rehabilitación de Espacios Degradados. Proyecto Fondef. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile.

Varnero, M., Faúndez, P Santibáñez, C., Alvarado, P 2004. Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustratos. En: Simposio Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales. Universidad de La Frontera, Temuco, Chile. Pp 477-481.

Varnero, M. 2005. V Taller de producción de compost. Aspectos técnico legales y desafíos. Santiago. Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 25p.

Varnero, M. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7 (1): 28-37

Viteri, S.; Granados, M; González, A. 2008. Potencial de los caldos rizósfera y súper cuatro como biofertilizantes para la sostenibilidad del cultivo de cebolla de bulbo (*Allium cepa*). *Agronomía. Colombiana*, Bogotá 26 (3): 517-524

Woods End Research Laboratory. (2005). Interpreting waste & compost tests. *Journal of the Woods End Research Laboratory* 2 (1). 6 p.

Zagal E, N Rodríguez, I Vidal, L Quezada. 2002. Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Agricultura Técnica (Chile)* 62: 297-309.

Zapata, R. 2006. Química de los procesos pedogenéticos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 358 p.

Zuconni, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldo, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*. 22: 54-57.

APÉNDICES

Apéndice I. Registro de temperatura interna promedio de las pilas en proceso de compostaje.

Día	T0	T1	Día	T0	T1	Día	T0	T1
°C			°C			°C		
1	19,0	52,9	29	18,0	48,5	56	20,8	35,4
2	19,9	41,6	30	15,2	44,7	57	19,8	43,2
3	21,3	47,4	31	16,0	45,8	59	20,3	45,4
4	22,1	48,3	32	17,3	41,3	60	19,7	43,6
5	24,5	44,4	33	17,4	41,4	61	18,7	42,2
6	26,3	45,0	34	19,3	41,0	62	15,5	41,7
7	25,2	46,0	35	21,1	42,6	63	17,0	41,3
8	25,3	47,9	36	20,6	42,8	64	17,2	41,3
9	23,9	39,2	37	22,1	42,9	65	22,1	41,5
10	27,0	48,2	38	22,0	43,0	66	24,0	40,4
11	29,4	51,4	39	21,7	46,1	67	24,7	40,1
12	28,7	56,4	41	20,4	44,2	68	25,3	38,9
13	26,5	45,0	42	19,4	44,3	70	43,5	37,7
16	29,6	40,0	43	18,8	44,4	77	37,1	34,5
17	29,4	39,4	44	18,6	44,6	79	36,2	34,1
18	30,1	52,8	45	17,3	44,6	80	42,6	34,0
19	25,4	58,6	46	16,3	45,7	81	38,9	33,8
20	26,8	53,1	47	16,5	47,0	83	42,2	33,5
21	27,9	52,7	48	17,9	46,6	84	42,8	33,3
22	28,8	54,8	49	17,8	46,4	85	42,1	33,2
23	28,6	44,4	50	21,7	45,1	86	41,5	33,0
24	28,3	50,8	51	22,0	44,2	87	43,9	32,8
25	27,4	50,8	52	20,0	41,9	88	45,6	32,6
26	25,5	51,1	53	21,0	39,8	89	46,7	32,6
27	22,8	49,6	54	20,7	37,8	90	52,5	32,3
28	20,2	49,2	55	21,4	36,8	91	53,9	32,2

(Continúa)

Apéndice I. (continuación)

Día	T0	T1	Día	T0	Día	T0
	°C			°C		°C
92	57,4	32,2	113	47,4	136	28,1
93	56,4	31,8	114	43,4	137	28,3
94	55,5	31,3	115	42,3	139	28,2
96	55,7	31,2	116	46,2	140	28,4
97	53,7		117	45,0	141	28,1
98	51,9		118	46,2	142	27,2
99	52,0		119	43,8	143	26,5
101	69,2		120	42,6	144	26,7
102	54,1		121	47,9	145	27,0
103	66,9		124	59,1	146	26,8
104	61,1		125	51,9	148	26,4
105	54,2		127	40,5	150	26,3
106	47,6		128	39,8	151	26,0
107	45,2		129	37,1	153	26,2
108	64,7		130	33,5	154	26,3
109	49,1		131	31,1	156	26,1
111	51,8		132	29,1	157	25,9
112	48,8		134	28,2	158	26,2

Apéndice II. Evolución de pH durante el proceso de compostaje.

Semana	T0	T1
1	6,29	6,60
3	6,60	6,32
4	6,81	6,51
5	6,91	6,45
7	7,05	6,05
8	7,20	6,10
10	7,27	6,13
11	7,37	6,50
13	7,27	7,11
14	7,45	
15	7,37	
17	7,32	
18	7,19	
20	6,70	
21	6,53	
22	6,52	
23	6,53	

Apéndice III. Análisis de Varianza (ANDEVA) de pH durante el proceso de compostaje.

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre tratamientos	1,7505	1	1,7505	13,5007	0,0012	4,259
Dentro de los tratamientos	3,1118	24	0,1297			
Total	4,8622	25				

Apéndice IV. Evolución de conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje.

Semana	T0	T1
1	3,08	2,75
3	2,86	1,52
4	2,72	1,23
5	2,72	0,93
7	2,64	0,83
8	2,60	1,03
10	2,57	0,99
11	2,57	0,85
13	2,46	0,99
14	2,50	
15	2,50	
17	1,94	
18	1,88	
20	1,57	
21	1,48	
22	1,37	
23	1,24	

Apéndice V. Análisis de Varianza (ANDEVA) de conductividad eléctrica durante el proceso de compostaje.**ANÁLISIS DE VARIANZA**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre tratamientos	6,3801	1	6,3801	18,6955	0,00023	4,2596
Dentro de los tratamientos	8,1904	24	0,3412			
Total	14,5705	25				

Apéndice VI. Evolución de la materia orgánica durante el proceso de compostaje.

Semana	T0	T1
1	89,2	92,6
3	90,9	85,3
5	85,8	77,4
7	87,9	73,4
9	82,3	75,9
11	83,2	72,9
13	77,4	70,9
14	72,6	67,7
15	70,5	
17	66,1	
19	65,2	
21	71	
23	62,4	

Apéndice VII. Análisis de Varianza (ANDEVA) de la evolución de materia orgánica durante el proceso de compostaje.

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre tratamientos	0,3264	1	0,3264	0,0037	0,9516	4,3807
Dentro de los tratamientos	1639,95	19	86,3135			
Total	1640,28	20				